ANNÉE 1962 N° D'ORDRE : 66

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE TROISIÈME CYCLE

EN PHYSIQUE NUCLÉAIRE

PAR

Jean PERRIGOT

ÉTUDE ET TECHNIQUES D'UTILISATION DE MATÉRIAUX FERROELECTRIQUES AUX TRÈS BASSES FRÉQUENCES

SOUTENUE LE 26 NOVEMBRE 1962, DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN :

MM.	A. SARAZIN	Président
	J. LAFOUCRIERE R. CHERY	Examinateurs
	L. EYRAUD	Invité

ANNÉE 1962

N° D'ORDRE : 66

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE TROISIÈME CYCLE

EN PHYSIQUE NUCLÉAIRE

PAR

Jean PERRIGOT

ÉTUDE ET TECHNIQUES D'UTILISATION DE MATÉRIAUX FERROELECTRIQUES AUX TRÈS BASSES FRÉQUENCES

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

SOUTENUE LE 26 NOVEMBRE 1962, DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN :

MM.	A. SARAZIN	Président
	J. LAFOUCRIERE R. CHERY	Examinateurs
	L. EYRAUD	Invité

UNIVERSITE DE LYON - FACULTE DES SCIENCES

Doyens Honoraires

M. LONGCHAMBON
M. DOUIN
M. MOUSSA

Professeurs Honoraires

MM. LOCQUIN
de LARAMBERGUE
DOEUVRE
SOLLAUD
MM. MENTZER
MOUSSA
JAFFARD

Doyen

M. GAUTHIER H.

Assesseur

M. BRACONNIER

Professeurs

MM. LONGCHAMBON	Minéralogie
DEJARDIN	Physique Générale
DOUIN	Botanique
EYRAUD Henri	Calcul Différentiel et Intégral
COURTY	Chimie-Physique
PRETTRE	Chimie Industrielle
KUHNER	Microbiologie et Mycologie
MALECOT	Mécanique rationnelle et appliquée
PARIS	Chimie minérale
AUMERAS	Chimie
COLONGE	Chimie organique
FLANDRIN	Géologie appliquée
JANIN	Physique expérimentale
BERNARD	Physique industrielle
DUFAY Jean	Astronomie
NIGON	Zoologie expérimentale
GAUTHIER Henri	Géologie générale
VIRET	Géologie générale
WAUTIER	Zoologie
CHOPIN	Chimie biologique
CUEILLERON	Chimie
BRACONNIER	Méthodes Mathématiques de la Physique

.../...

MM.	EYRAUD Charles	Chimie-Physique Appliquée
	SARAZIN	Physique Nucléaire
	PERES	Physiologie
	MESNARD	Electronique
	GRANDMONTAGNE	Physique
	BOIDIN	Botanique
	BOUTILLIER	Minéralogie
	LAFOUCRIERE	Physique Nucléaire
	DREUX	Chimie organique
	TEICHNER	Chimie industrielle
	PAVANS de CECCATTY	Zoologie
	DUFAY Maurice	Physique de l'atmosphère
	MERLIN	Chimie analytique

Professeurs sans chaire

MM.	GAUME	Physique
	PHILBERT	Physique Nucléaire
	COHEN-ADAD	Chimie
	DEPRAZ	Physique Nucléaire
	FERON	Mathématiques
	LAFORGUE	Physique
	DAVID Louis	Géologie générale
	GAUTHIER Jean	Chimie
	LEGAY	Zoologie expérimentale S.P.C.N.
	UZAN	Physique S.P.C.N.
	CHENEVOY	Géologie appliquée

Maîtres de Conférences

Mle	MAITROT	Physique
MM.	CHANEL	Psychophysiologie
	ASCH	Physique
	GINET	Zoologie
	MAURY	Mathématiques
	MICHEL	Minéralogie
Mme	ERICSON	Physique Générale
	GEVIN	Géologie générale
	PONASSE	Mathématiques
	MARTEL	Mécanique
	CHERY	Physique
	LEFEBVRE	Mathématiques
	d'INCAN	Physique
	PERNET	Mathématiques
Mle	GAUTHERON	Chimie Biologique
	BERGEON	Physique C.S.U.
	MATHIEU	Mécanique des Fluides (Ecole Centrale)
	LUBET	Physiologie

.../...

MM.	DUCET	Biologie végétale
	ERBEIA	Physique
	DESCOTES	Chimie organique
	PICARD	Mathématiques

Maîtres de Conférences Adjoints

MM.	PIERRON	Chimie
	LEMONDE	Physique

Secrétaire Principal Honoraire

M. ROUX

Secrétaire Principal

M. BURNET

Ce travail a été réalisé dans les laboratoires du Département de Physique de l'Institut National des Sciences appliquées, dirigé par Monsieur le Professeur René Bernard.

Monsieur le Professeur Lucien Eyraud a suivi avec beaucoup de patience et de bienveillance toutes les phases de notre travail, nous guidant de ses conseils judicieux et précis, tant sur le plan théorique que sur le plan technique. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de toute notre gratitude.

Nous remercions particulièrement Monsieur le Professeur A. Sarrazin, Directeur de l'Institut de Physique Nucléaire de Lyon, qui a bien voulu suivre nos travaux, et nous faire l'honneur de présider notre jury.

Nous remercions nos maîtres, Monsieur le Professeur J. Lafoucrière, et Monsieur R. Chéry, Maîtres de Conférences à la Faculté des Sciences qui ont bien voulu accepter de faire partie de notre jury.

Nous devons beaucoup à Madame Fétiveau, Chef de travaux à l'Institut National des Sciences Appliquées, qui nous a mis au courant de nombreux problèmes relatifs aux ferroélectriques.

Nous voudrions aussi remercier Monsieur Richard, Chef de travaux à l'Institut National des Sciences Appliquées, et nos collègues Assistants électroniciens, Messieurs R. Isaac, A. Roux et M. Sarreau ; ils ont su créer dans nos laboratoires de recherches comme dans nos laboratoires d'enseignement, l'atmosphère d'enthousiasme et de solidarité nécessaire au travail d'équipe. Nous leur devons de très nombreuses suggestions.

Nous ne saurions oublier nos camarades techniciens, et le concours particulièrement apprécié de Mademoiselle Dizin qui a participé à de nombreuses mesures.

TABLE DES MATIERES

Introduction 1

Chapitre I - Expériences fondamentales et définitions 4

Chapitre II - Montages auxiliaires en vue d'une étude systématique des variations de la capacité locale 18

Chapitre III - Mesures systématiques 26

Chapitre IV - Interprétation qualitative du phénomène d'hystérésis 39

Chapitre V - Application des céramiques ferroélectriques à l'amplification très basse fréquence 49

Conclusion 55

I N T R O D U C T I O N

On dit que des matériaux sont ferroélectriques lorsqu'ils possèdent un certain nombre de propriétés diélectriques souvent concomitantes. Ces propriétés rappellent celles des corps ferromagnétiques, bien qu'elles se présentent souvent sur un intervalle de températures plus réduit. Citons par exemple :

a) L'existence d'une polarisation spontanée. Il peut exister plusieurs directions privilégiées lorsque le ferroélectrique considéré est un monocristal.

b) La forme de la courbe donnant la polarisation en fonction du champ. Lorsque le champ varie alternativement, on obtient un cycle d'hystérésis assez analogue aux cycles H = f(I) des ferromagnétiques. (H étant le champ magnétique, I l'intensité d'aimantation).

c) La variation de permittivité diélectrique en courant alternatif, résultant de la superposition au champ alternatif d'un champ continu ou lentement variable.

d) La variation des dimensions sous l'effet d'un champ électrique, ou électrostriction.

e) L'étroite dépendance existant entre ces propriétés et la température du corps ferroélectrique.

Les ferroélectriques connus sont déjà très nombreux. Le plus anciennement étudié est le sel de Seignette ($CO_2K - CHOH - CHOH - CO_2Na$, 4 OH_2) qui se présente sous forme de gros monocristaux (1). Notons que les publications soviétiques n'utilisent pas le terme "ferroélectricité" des Anglo-Saxons, mais le terme "Seignetto-électricité". On peut citer également le phosphate monopotassique KH_2PO_4, présentant des propriétés ferroélectriques à basse température.

.../...

Son dérivé KD_2PO_4, obtenu par substitution de deuterium à l'hydrogène, a donné lieu à des études plus poussées (2), ses propriétés ferroélectriques apparaissant à des températures aisément accessibles.

Plus récemment, de nombreuses recherches ont été effectuées aux Etats Unis sur le titanate de Barium ($Ba\ Ti\ O_3$) et certains de ses composés. Par suite de la difficulté d'obtenir des monocristaux, la plupart des études ont porté sur des céramiques. Ce sont des assemblages de monocristaux. Leurs procédés de fabrication comportent souvent des phases relativement empiriques, et font l'objet de nombreux brevets. On peut consulter à ce sujet la documentation rapportée par Sachse (3).

Notre laboratoire a étudié de façon approfondie la fabrication et les propriétés des solutions solides de titanates mixtes de Ba et de Sr, de formule générale :

$$\left[(Ba_x\ Sr_{(1-x)}\right] Ti\ O_3$$

(4) (5) (6).

L'avancement de ces travaux nous autorise à aborder le chapitre des applications. Nous examinons les possibilités d'emploi des céramiques ferroélectriques dans le domaine des basses fréquences. Pratiquement, chacune des propriétés énumérées peut donner lieu à une classe d'applications. Par exemple, l'hystérésis peut faire l'objet d'une étude systématique destinée à rechercher des conditions d'utilisation des céramiques dans les dispositifs à mémoires (7).

Nous avons étudié particulièrement les conditions d'une variation linéaire de la permittivité, en régime alternatif, avec un champ lentement variable superposé au champ alternatif. Dans ces conditions, le ferroélectrique peut être regardé comme une capacité dont la valeur dépend d'une tension continue. Il joue ainsi, pour le courant alternatif, le rôle que joue un tube pour un courant continu, et permet des montages amplificateurs. De nombreux travaux ont déjà été entrepris sur l'amplificateur diélectrique (8) (9).

Il est à remarquer cependant que les amplificateurs classiques pour courants alternatifs présentent de nombreuses qualités difficilement égalables. Il nous a donc paru intéressant de décomposer les fonctions de l'amplificateur diélectrique conventionnel : - modulation d'amplitude
- amplification de puissance.

On utilise alors la céramique ferroélectrique comme modulateur, transformant un signal continu ou lentement variable en une variation de courant alternatif, sans considération de gain en tension ou en puissance. Actuellement, les dispositifs les plus sûrs et les plus efficaces jouant ce rôle sont souvent mécaniques : citons les vibreurs utilisés pour hacher la tension de sortie d'une source de courant continu, ou encore la capacité oscillante utilisée pour transformer en courant alternatif le très faible courant continu des chambres d'ionisation. Il n'est donc pas sans intérêt de disposer d'un élément plus souple et moins coûteux qu'un système mécanique, et possédant par ailleurs des quali-

.../...

tés de bruit de fond, de dérive ou d'efficacité qui semblent pouvoir être exploitées avec intérêt.

Nous nous sommes attachés à faire le lien entre l'étude physique et les applications techniques. C'est pourquoi nous avons tracé, non les cycles d'hystérésis classiques, mais les courbes donnant la capacité en fonction d'un champ électrique de polarisation, qui nous semblent plus directement utilisables par le technicien. C'est dans cet esprit que le modulateur et l'amplificateur décrits au chapitre V sont réduits à leur schéma le plus simple. Il va de soi que ces schémas peuvent être améliorés par l'emploi des techniques d'asservissement.

CHAPITRE I

EXPERIENCES FONDAMENTALES ET DEFINITIONS

I - CYCLES D'HYSTERESIS DIELECTRIQUE

a) Rappels d'électrostatique

Le corps ferroélectrique étudié peut former le diélectrique d'un condensateur plan γ. Si d est l'épaisseur du ferroélectrique, V la tension appliquée entre les armatures, nous dirons que le champ appliqué est :

$$E = \frac{V}{d}$$,E étant normal aux armatures.

La polarisation du ferroélectrique, $\vec{P} = \frac{\overrightarrow{dM}}{d\tau}$, ou moment électrique par unité de volume, est une certaine fonction du champ appliqué E. Dans un diélectrique parfait, on peut écrire :

$$\vec{P} = \varepsilon_o \chi_r \vec{E}$$

(ε_o étant la constante diélectrique du vide)

χ_r, la susceptibilité relative du diélectrique, est une constante. Mais dans un ferroélectrique, χ_r n'est ni une constante, ni même une fonction uniforme de E. Cependant, on peut conserver les définitions de l'électrostatique qui ne font pas intervenir la relation entre $\vec{P}$ et $\vec{E}$. En chaque point du ferroélectrique, l'induction électrique reste définie par la relation :

$$\vec{D} = \varepsilon_o \vec{E} + \vec{P}$$

La charge par unité d'aire des armatures est : $\sigma = D_n$
(composante normale de l'induction).

On aura pratiquement toujours $|\varepsilon_o \vec{E}| \ll |\vec{P}|$, de sorte que $D_n \simeq P_n$. La charge d'un condensateur plan γ est donc proportionnelle à la polarisation normale du ferroélectrique placé entre ses armatures.

b) Les cycles d'hystérésis de Sawyer et Tower (fig. 1)

L'existence des cycles d'hystérésis est une des propriétés avec

.../...

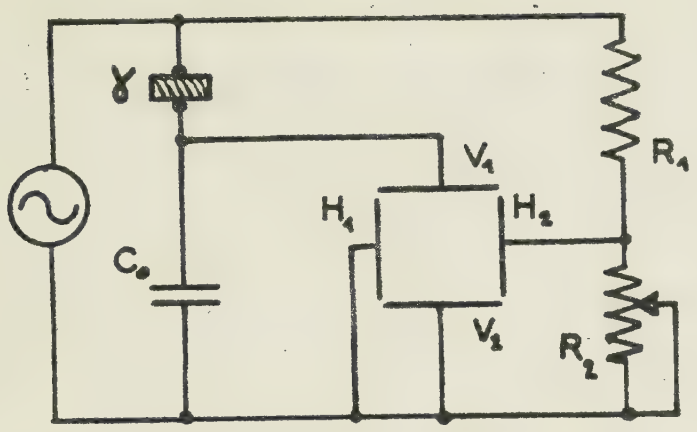


Fig1. Montage de Sawyer et Tower. [ ]

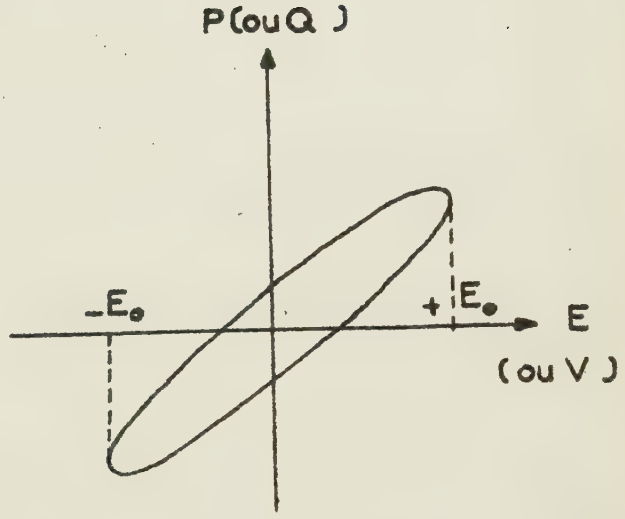


Fig 2. Cycle d'un diélectrique quelconque.

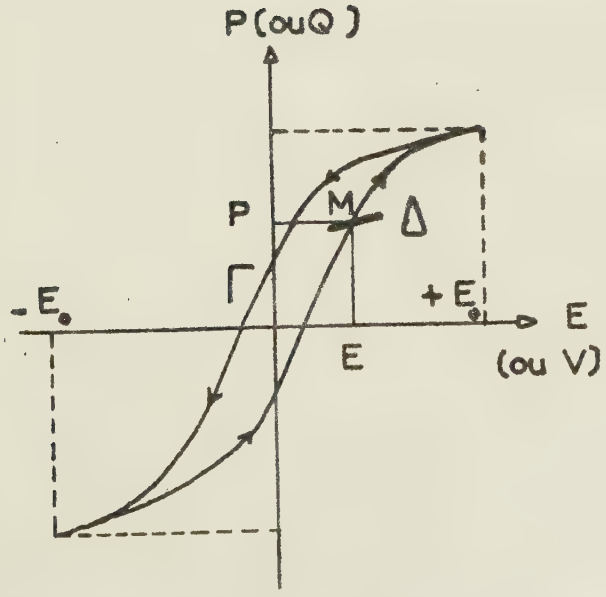


Fig 3. Cycle d'un ferroélectrique.

lesquelles nous avons caractérisé la ferroélectricité.

Le corps ferroélectrique est placé entre les armatures d'un condensateur plan γ . Une source de tension alternative est connectée en série avec γ et une grosse capacité C_o. On sait que sous la condition :

$$C_o \gg \gamma$$

on recueille aux bornes de C_o une tension proportionnelle à la charge prise par la capacité γ . Cette tension est appliquée aux plaques de déviation verticale (V_1 V_2) d'un oscilloscope. Une fraction de la tension aux bornes de la source est appliquée aux plaques de déviation horizontale (H_1, H_2). La courbe qui s'inscrit sur l'écran de l'oscilloscope est donc alors un cycle d'hystérésis : $Q = f(V)$. Avec un étalonnage convenable de l'écran, on peut en déduire les cycles $P = f(E)$.

c) Définitions relatives aux cycles d'hystérésis

Appliquons donc à un condensateur à diélectrique ferroélectrique une tension V décrivant un cycle de très basse fréquence F, entre deux valeurs symétriques $+ V_o$ et $- V_o$. Notons Γ le cycle d'hystérésis : $Q = f(V)$.

Simultanément, superposons à V une tension d'amplitude beaucoup plus faible, et de fréquence f beaucoup plus grande que celles du cycle T.B.F. Comme $f \gg F$, le point (Q, V) décrit autour de chaque point M du cycle Γ une courbe presque fermée.

Nous avons effectivement réalisé cette manipulation avec une fréquence du cycle T.B.F. prise entre 0,05 et 0,5 Hz, la fréquence f de la tension alternative superposée étant le 50 Hz du réseau . Nous en donnons le schéma de principe (fig. 4). L'amplificateur à large bande A est l'amplificateur de déviation verticale de l'oscilloscope. Nous décrirons ultérieurement la source T.B.F.

On observe sur l'écran de l'oscilloscope une ellipse aplatie se déplaçant le long du cycle Γ (fig. 5). On peut, en première approximation, assimiler cette ellipse à un segment de droite Δ (fig. 3). En tout point M du cycle , nous pourrons donc distinguer :

la capacité différentielle : $C_d = \left(\frac{dQ}{dV}\right)_\Gamma$, pente de Γ

la capacité locale : $C_l = \left(\frac{dQ}{dV}\right)_\Delta$, pente de Δ

On peut tracer la courbe : $C_l = f(V)$ au cours d'un cycle T.B.F. Nous conviendrons de nommer cette courbe le cycle de capacité locale.

Remarque : On peut aussi parler du cycle d'hystérésis : $P = f(E)$.
On introduit alors :

la susceptibilité différentielle : $\chi_d = \left(\frac{dP}{dE}\right)_\Gamma$, pente de Γ

la susceptibilité locale : $\chi_l = \left(\frac{dP}{dE}\right)_\Delta$, pente de Δ .

.../...

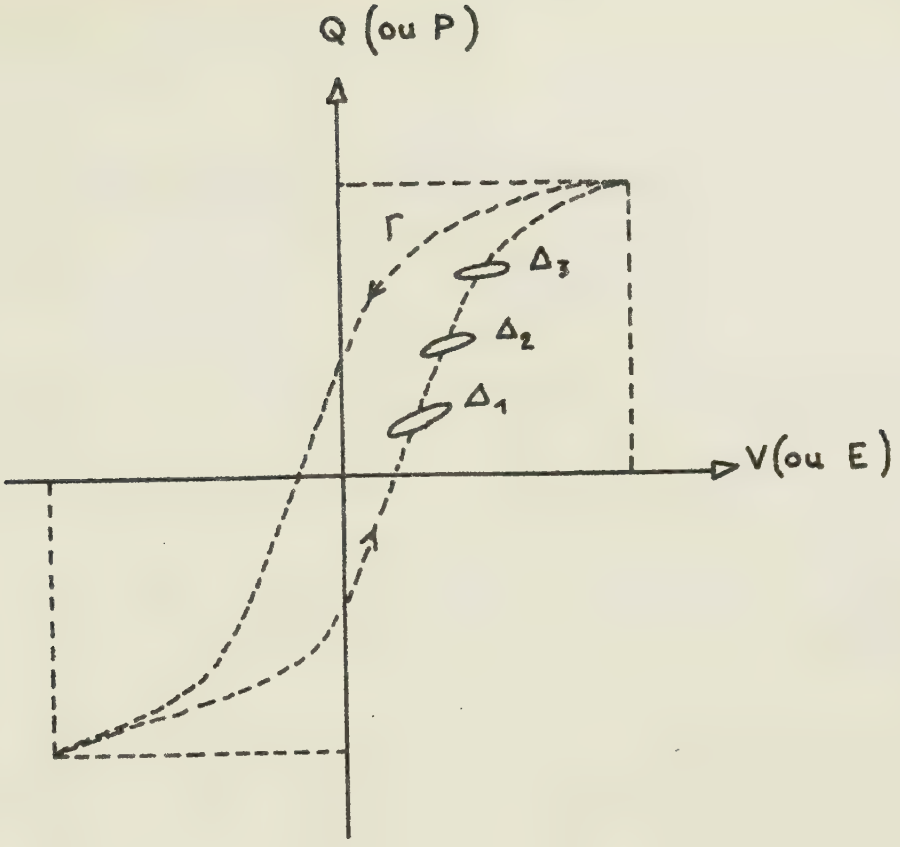


Fig 5

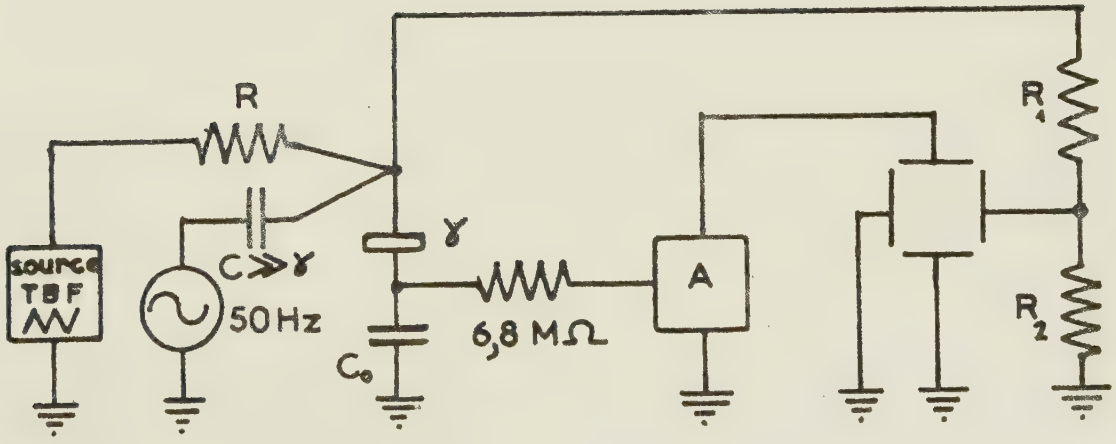


Fig 4 _ Montage d'essais.

II - CHOIX DU FERROELECTRIQUE ET D'UNE FREQUENCE D'UTILISATION

Nous avons utilisé comme point de départ le travail de Madame Fétiveau (6) qui cherchait à vérifier si la loi de Curie-Weiss, valable pour le titanate de Barium, l'est aussi pour toutes les solutions solides :

$$\left[Ba_x\ Sr_{(1-x)}\right]\ Ti\ O_3$$

Pour faire varier le paramètre x, Madame Fétiveau a préparé une quinzaine de solutions solides allant du Ba Ti O_3 pur au Sr Ti O_3 pur, en utilisant la réaction :

$$x\ Ba\ CO_3 + (1-x)Sr\ CO_3 + Ti\ O_2 \longrightarrow (Ba_x\ Sr_{1-x})\ Ti\ O_3 + \left[\overline{CO}_2\right]$$

La technique de préparation a été décrite par MM. L. Eyraud (4), P. Turlier (5), et résumée par Madame Fétiveau (Thèse 1961 - pages 25-26). Nous rappelons simplement qu'après préparation, la solution solide se présente sous la forme d'une pastille cylindrique robuste, argentée sur ses deux faces.

Admettant que le champ effectif agissant sur un dipôle est de la forme : $E' = E + \beta \frac{P}{\varepsilon_o}$, Madame Fétiveau a tracé en fonction du paramètre x, caractérisant la teneur en barium de l'échantillon, une série de courbes donnant notamment :

- la constante diélectrique ε_r (mesurée à 1000 Hz, avec une faible amplitude, sur des échantillons vierges)
- la température de Curie T_c
- le facteur de champ β

Deux remarques importantes sont à faire sur ces courbes :

a) Le facteur de champ β passe par un maximum lorsque la composition est d'environ 75 % Ba, 25 % Sr.

b) Pour cette composition, la température de Curie est d'environ 320º K soit 47º C. Il semble donc que le pourcentage de 25 % de strontium est privilégié et renforce tout particulièrement les propriétés ferroelectriques du titanate de barium. Madame Fétiveau fait remarquer que pour ce pourcentage privilégié il pourrait exister une structure dans laquelle deux ions Sr occupent deux sommets opposés de la maille cubique élémentaire (fig. 10).

Nous avons donc choisi pour nos essais une céramique ferroelectrique (Ba 75, Sr 25) Ti O_3. Ce choix présente un avantage expérimental certain : il est relativement commode de stabiliser une température située à une vingtaine de degrés au-dessus de la température ambiante. Notons que des mesures de variation de $\chi_{\frac{1}{2}}$ avec le champ continu superposé, à une fréquence de 50 Hz, effectuées avec des céramiques de composition allant de 20 à 80 % de Ba indiquaient une variation relative maximum avec une composition d'environ 68 % Ba et 32 % Sr. Ces mesures étant faites à la température ambiante (environ 23º C), qui est à peu

.../...

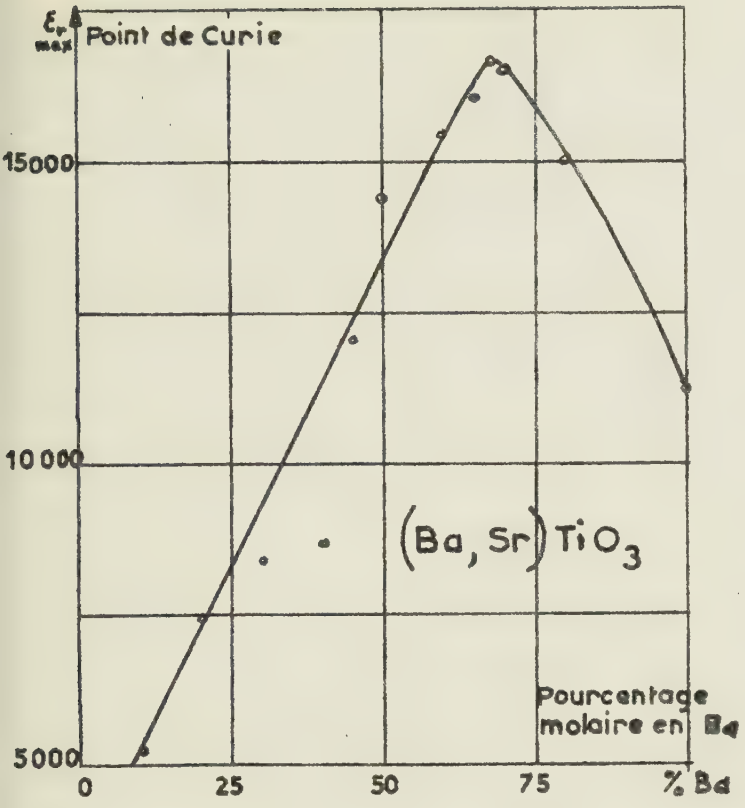


Fig 6 _ Variations de $\varepsilon_{r\,max}$ avec le pourcentage molaire en Ba _

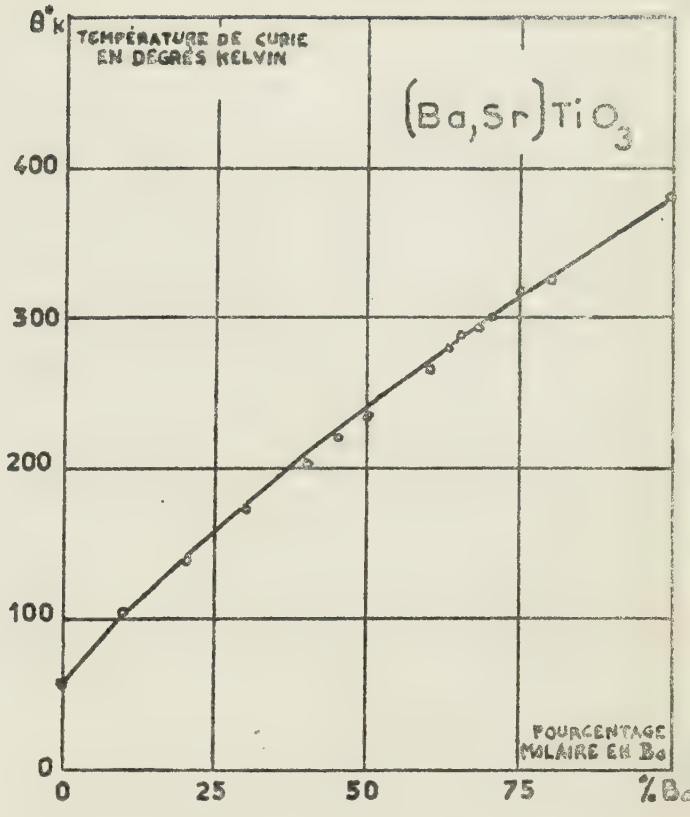


Fig 7 _ Variations de la température de Curie avec le % Ba.

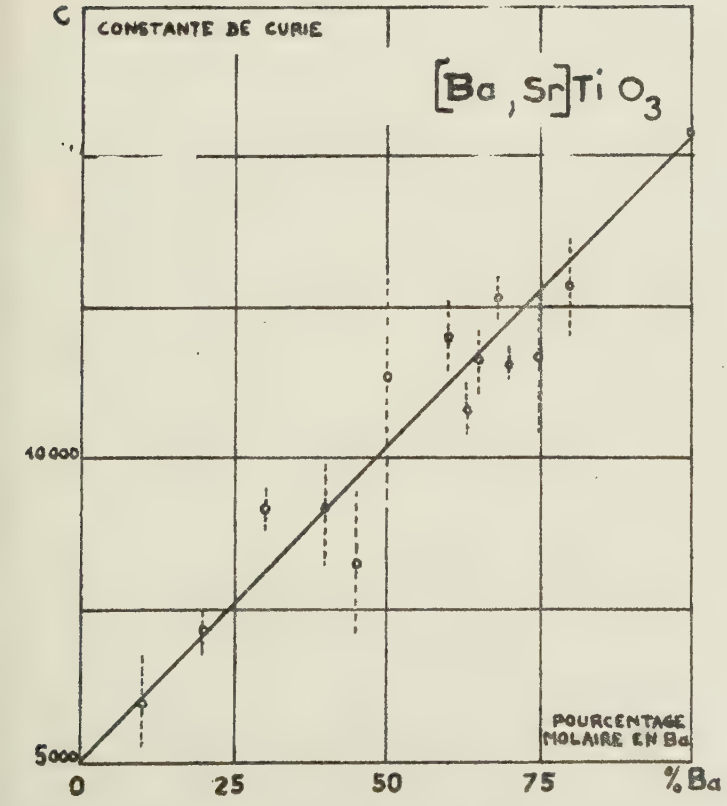


Fig 8 _ Constante de Curie _

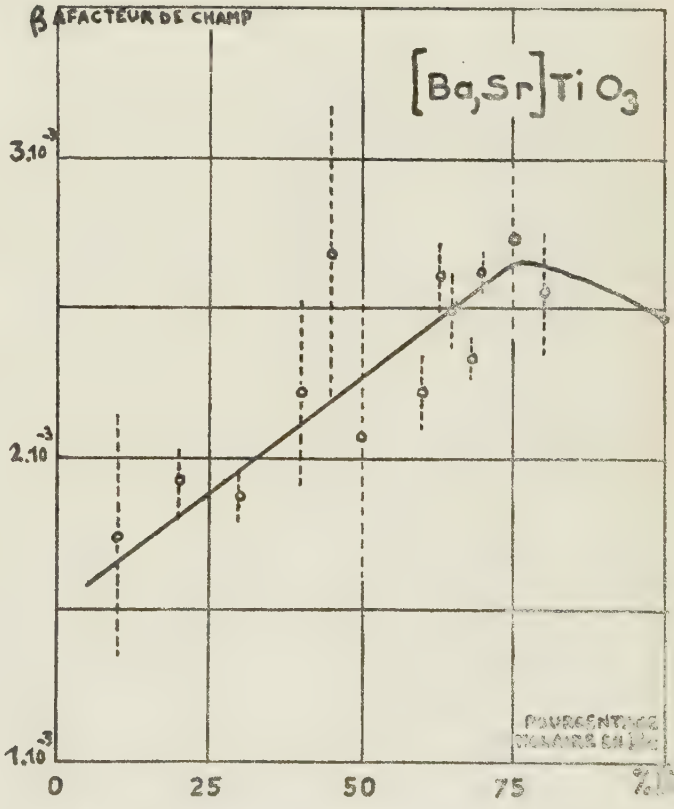


Fig 9 _ Facteur de champ _

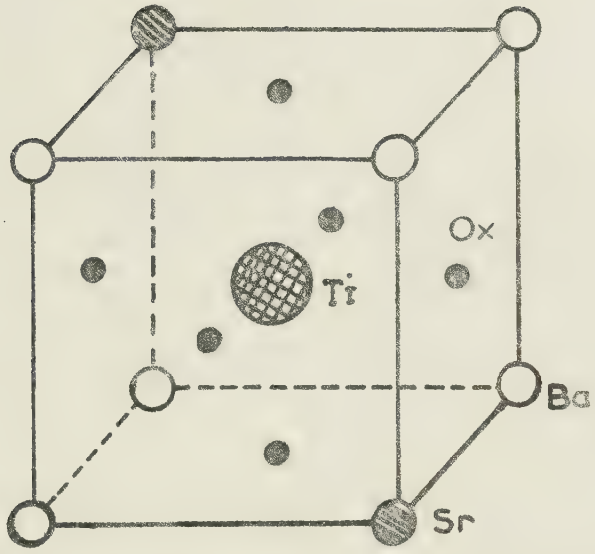


Fig 10_Maille cubique élémentaire_

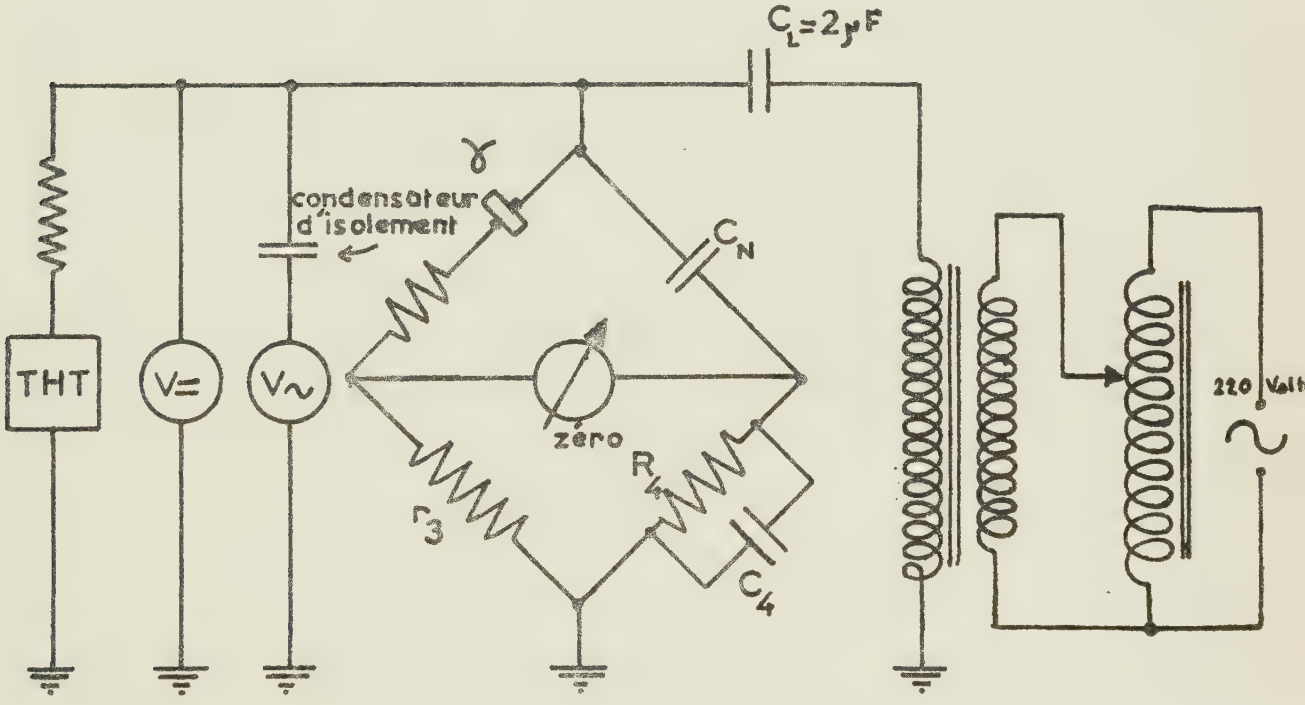


Fig 11 _ Montage d'étude _

près la température de Curie de ces échantillons, semblaient montrer qu'il y avait avantage à travailler autour de la température de Curie de l'échantillon.

III - LE MONTAGE D'ETUDE

Nous avons pensé qu'il pouvait être commode d'utiliser la variation d'amplitude d'une onde à la fréquence de 50 Hz pour réaliser une amplification de tension ou de puissance en très basse fréquence. C'est pourquoi nous avons tracé les courbes :

$$C_\ell = f(V)$$

(C_ℓ étant la capacité locale et V la tension appliquée) pour une céramique (Ba 75, Sr 25) $Ti\ O_3$, à différentes températures entourant la température de Curie.

Le schéma du montage est donné (fig. 11). La source de T H T est réglable de façon continue dans chacune des trois gammes : 500 ; 1500 ; 5000 V. Un inverseur permet de changer le sens de branchement de la capacité - céramique. La céramique est reliée à l'une des branches d'un Pont de Schéring (Trub, Täuber-Zurich) qui permet, par équilibrage, une mesure simultanée de la constante diélectrique et de l'angle de pertes. La fréquence du cycle de constante diélectrique locale étant 50 Hz, le pont est alimenté en courant alternatif grâce à un autotransformateur et à un transformateur d'isolement.

Au cours de ces mesures, l'échantillon est plongé dans une enceinte contenant une huile au silicone maintenue à une température bien définie.

IV - RESULTATS

Nous voyons que la variation de C_ℓ avec V est linéaire pour un grand intervalle de variations de V lorsque l'on se place exactement à la température de Curie. Mais le phénomène le plus important est certainement la disparition, au point de Curie, de l'hystérésis et des pertes. (fig. 12 - 13 - 14 - 15 - 16 - 17).

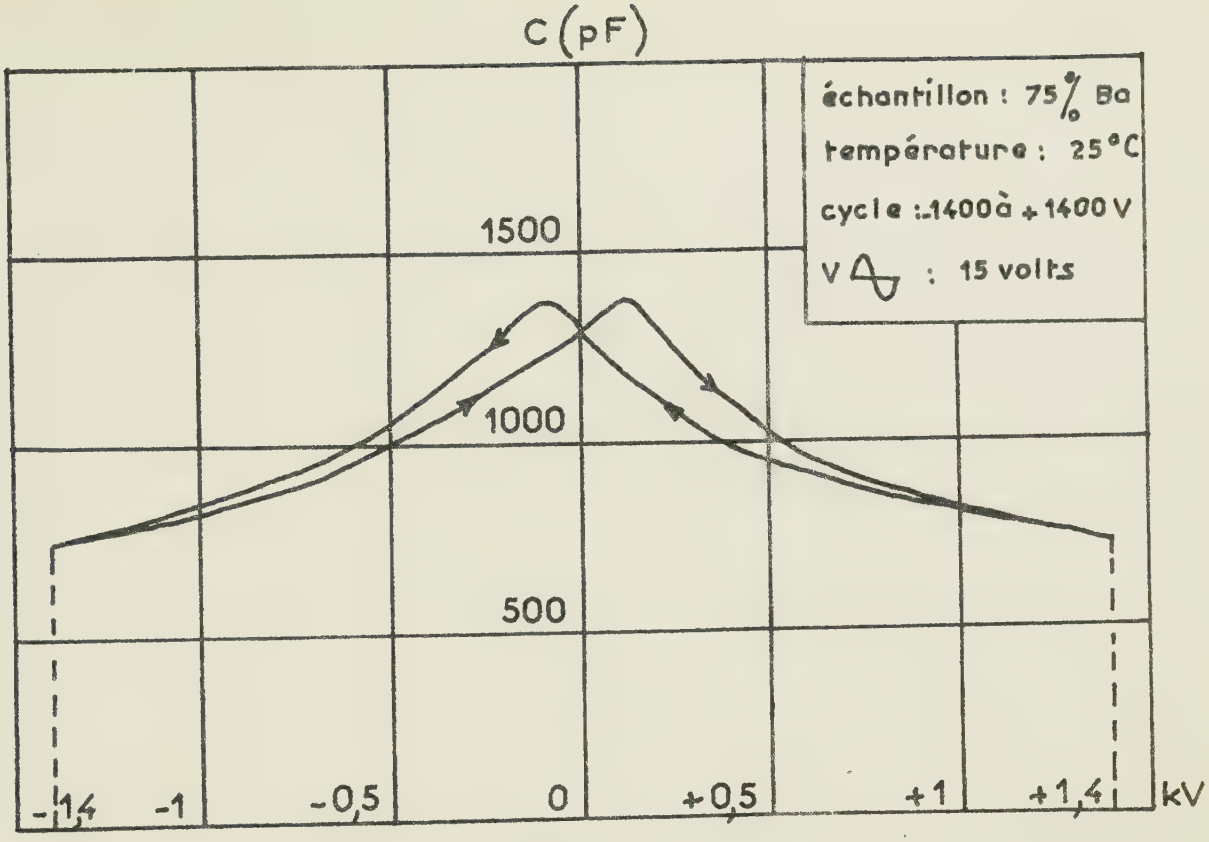

C (pF)
échantillon : 75% Ba
température : 25°C
cycle : -1400 à +1400 V
V ∿ : 15 volts
1500
1000
500
-1,4
-1
-0,5
0
+0,5
+1
+1,4
kV

Fig 12

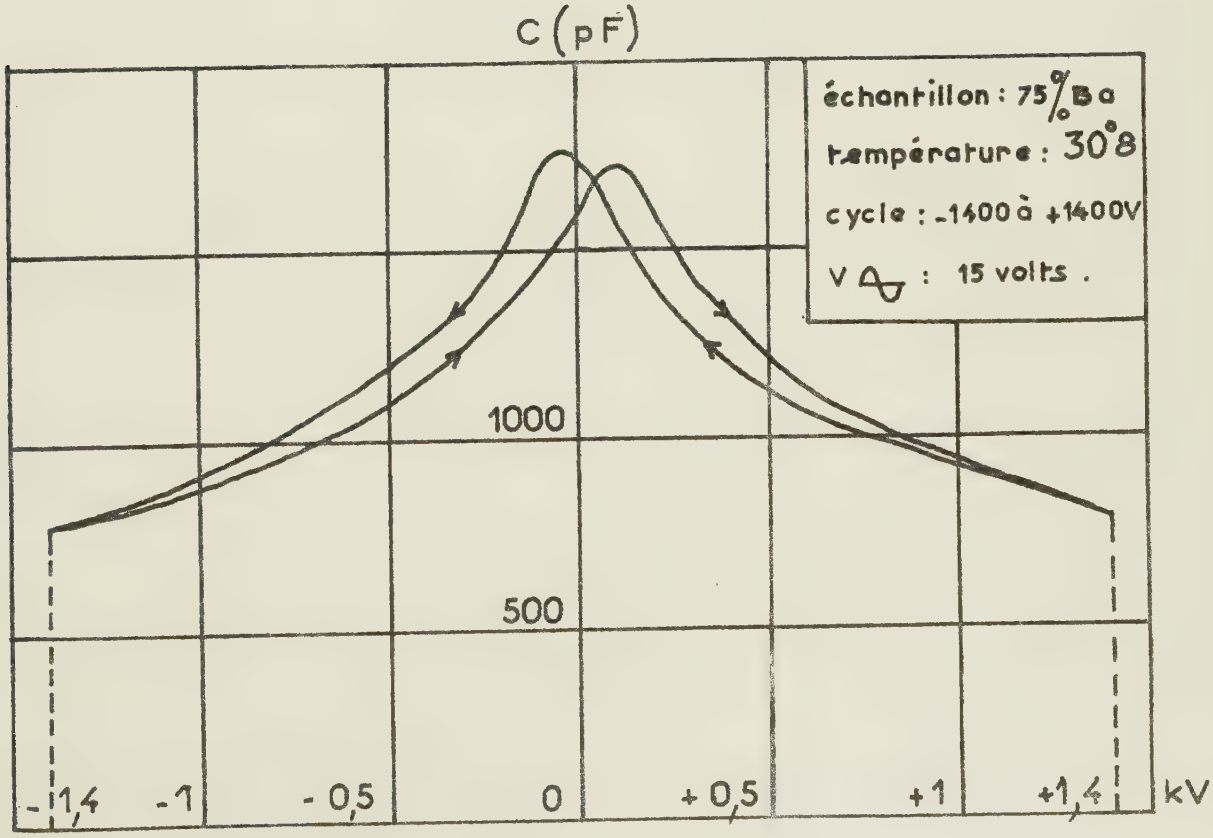

C (pF)
échantillon : 75% Ba
température : 30°8
cycle : -1400 à +1400V
V ∿ : 15 volts .
1000
500
-1,4
-1
-0,5
0
+0,5
+1
+1,4
kV

Fig 13

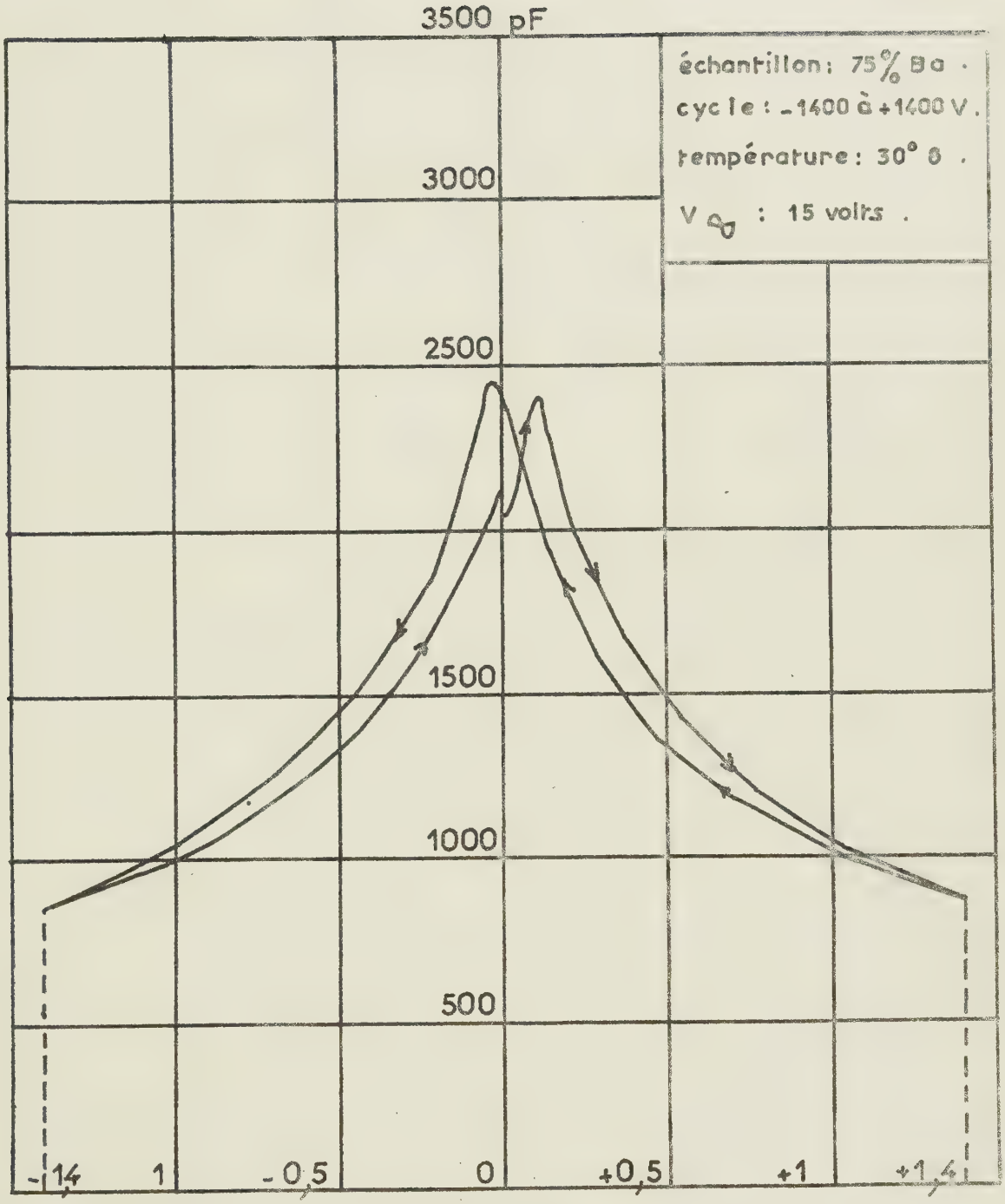

3500 pF
échantillon : 75% Ba .
cycle : -1400 à +1400 V.
température : 30° C .
V ∞ : 15 volts .
3000
2500
1500
1000
500
-1,4
-1
-0,5
0
+0,5
+1
+1,4
kV

Fig 14

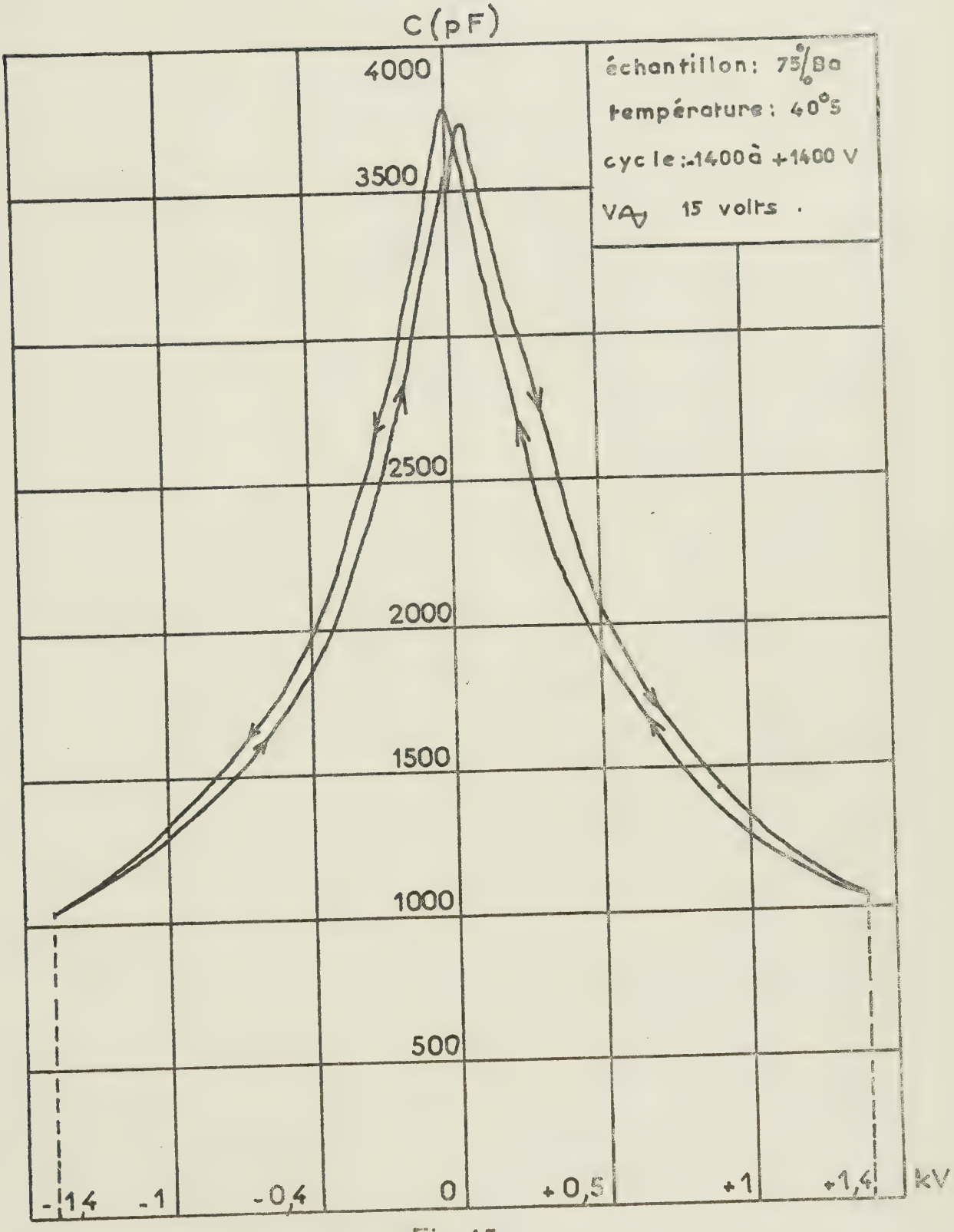

C(pF)
4000
3500
2500
2000
1500
1000
500
échantillon: 75% Ba
température: 40°S
cycle: -1400 à +1400 V
VA 15 volts .
-1,4
-1
-0,4
0
+0,5
+1
+1,4
kV

Fig 15

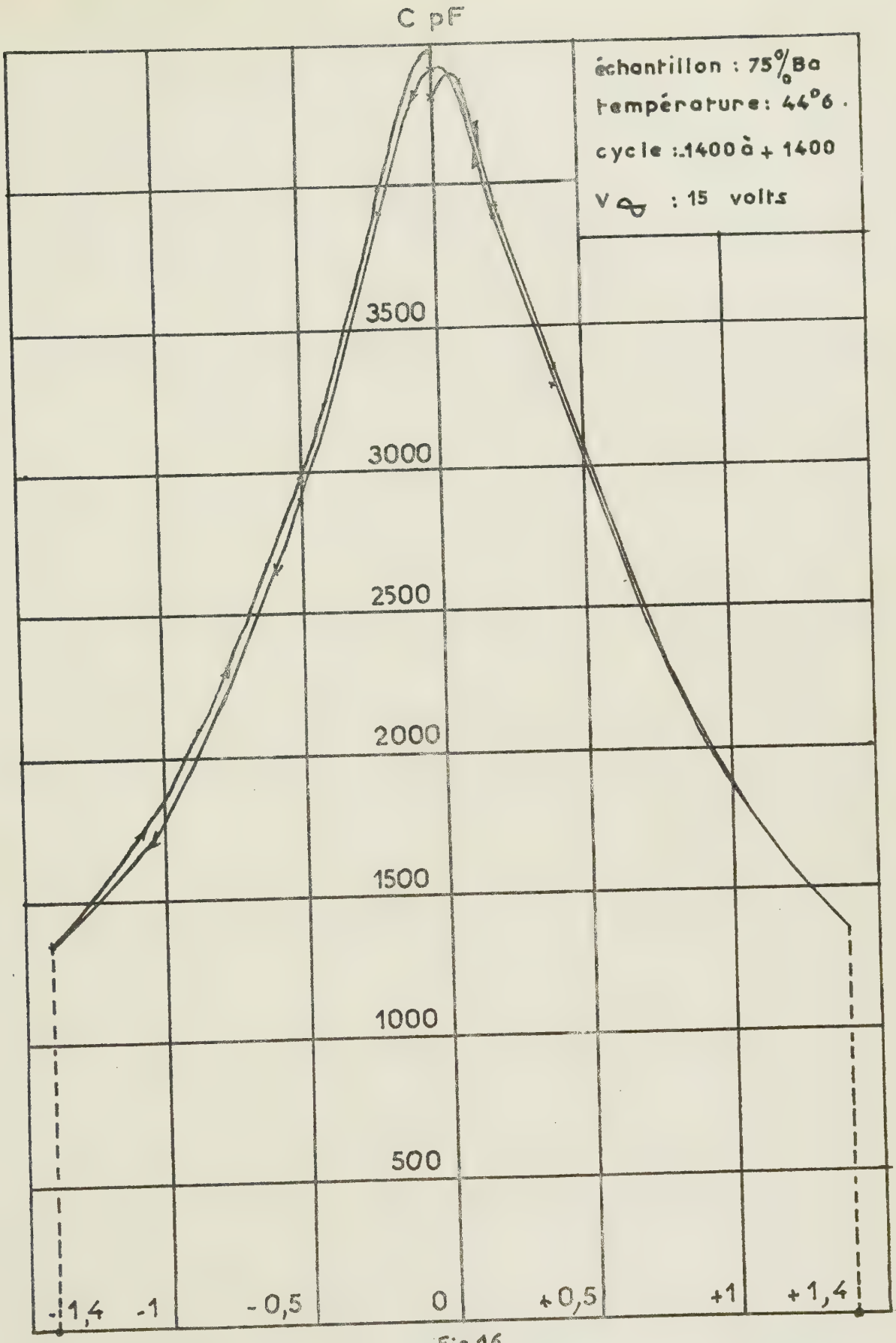

C pF
échantillon : 75% Ba
température : 44°6 .
cycle : -1400 à + 1400
V ∞ : 15 volts
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
-1,4
-1
-0,5
0
+0,5
+1
+1,4
kV

Fig 16

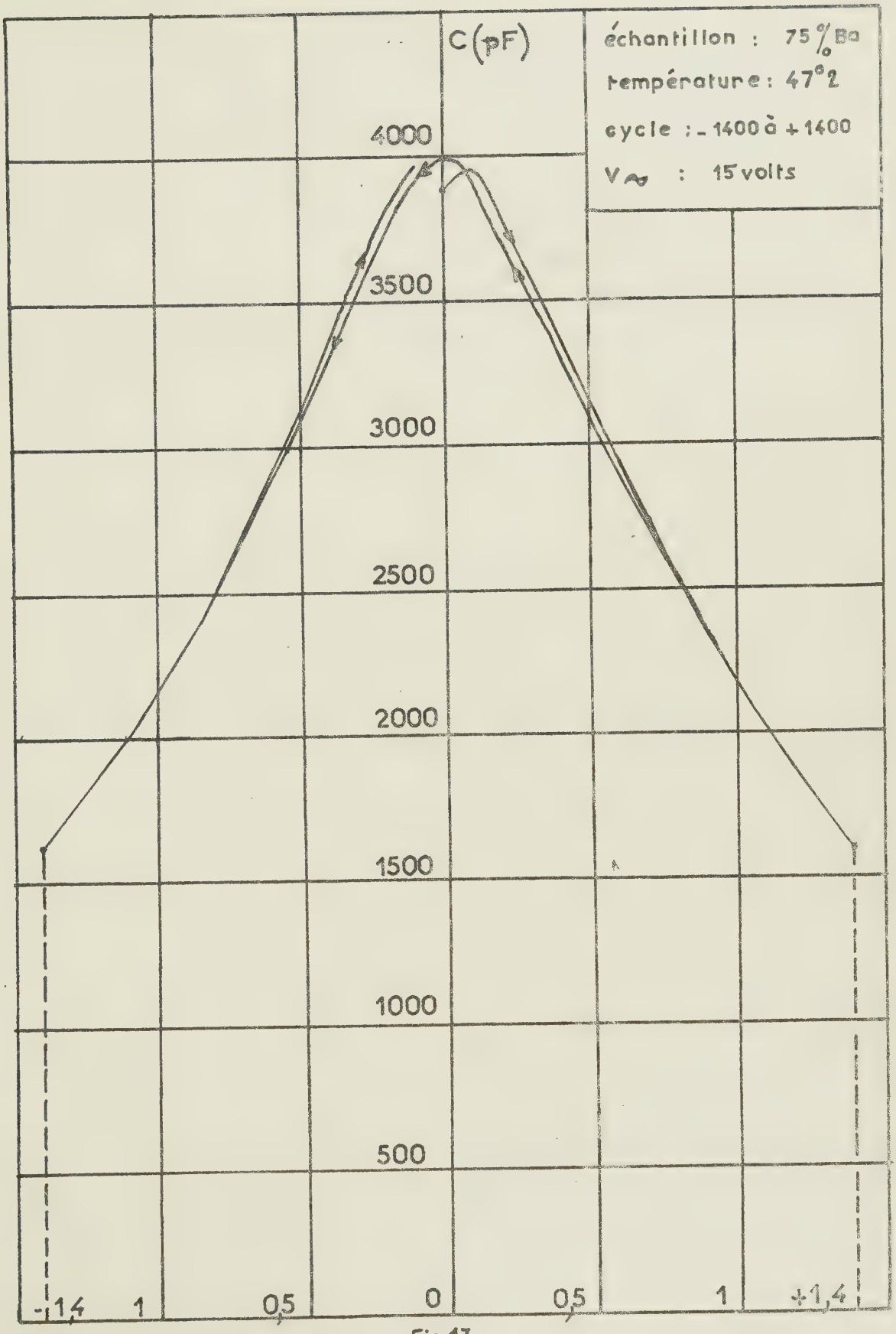
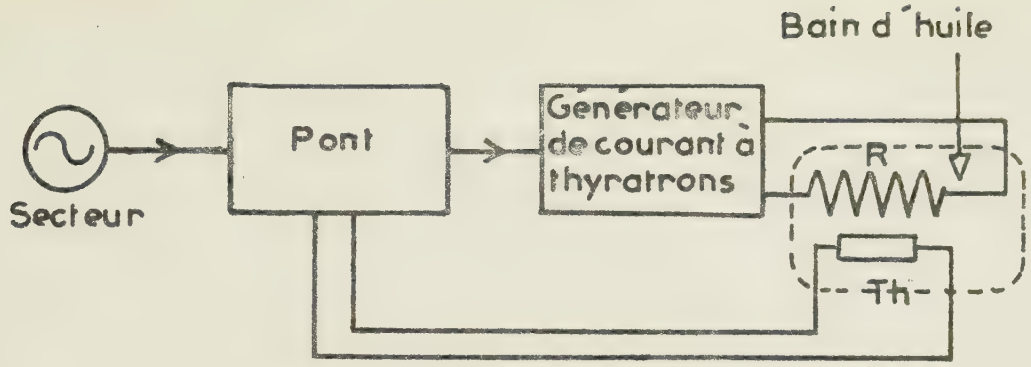

C(pF)
échantillon : 75 % Ba
température : 47°2
cycle : - 1400 à + 1400
V ~ : 15 volts
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
-1,4
1
0,5
0
0,5
1
+1,4
kV

Fig 17



R = résistance de chauffage.
Th = thermistance.

Fig 18_ Bloc-diagramme du régulateur de températures.

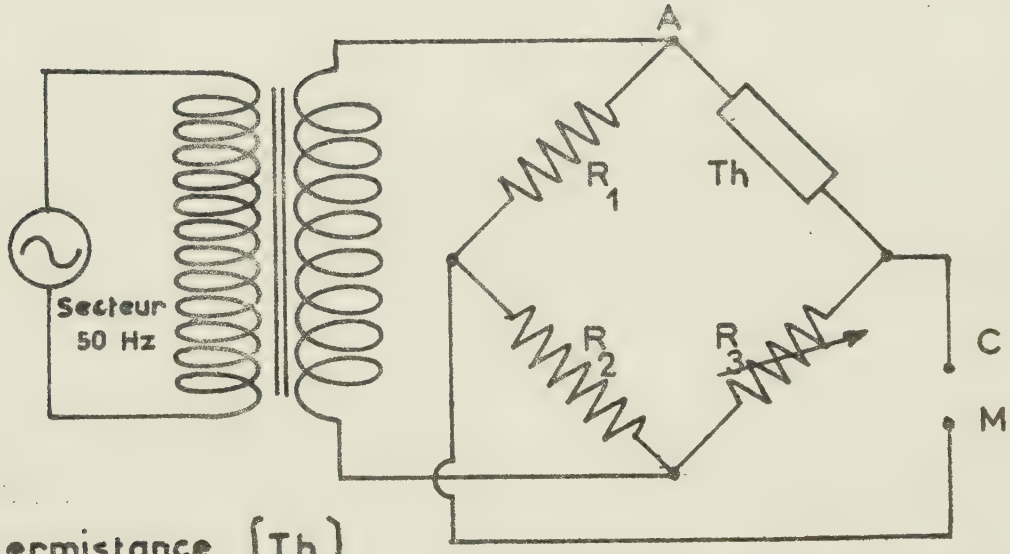


Fig 19_

Pont à thermistance. (Th)

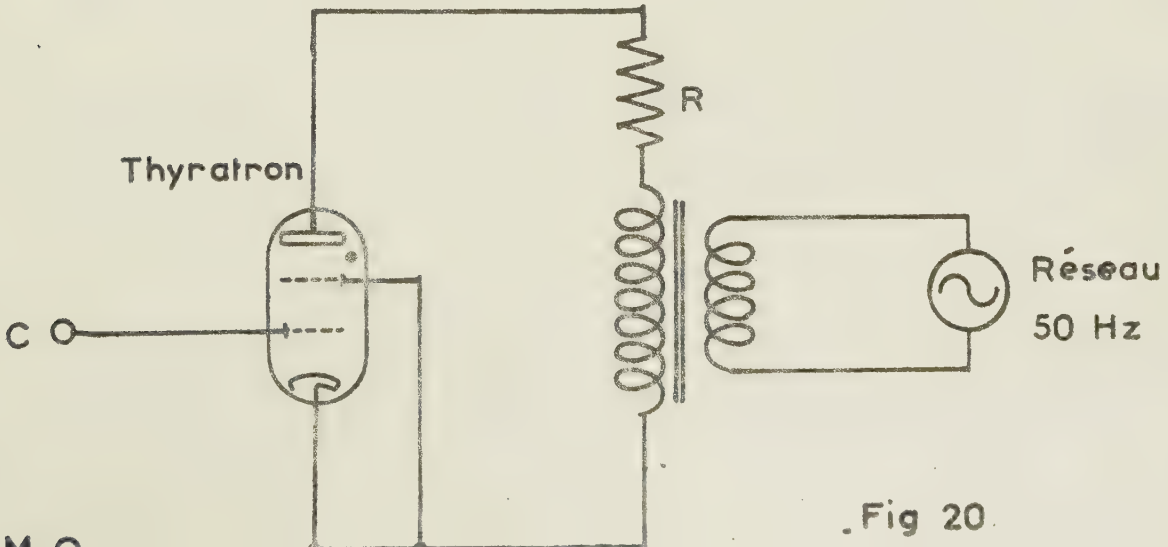


Fig 20

CHAPITRE II

MONTAGES AUXILIAIRES EN VUE D'UNE ETUDE SYSTEMATIQUE DES VARIATIONS DE LA CAPACITE LOCALE

L'étude précédente nous a fourni des courbes directement utilisables lors de la réalisation d'un amplificateur fonctionnant à la fréquence locale de 50 Hz. Cependant, nous avons voulu voir ce qu'il advient lorsque l'on utilise une fréquence locale différente de 50 Hz, ou lorsque la fréquence de description du cycle varie, ou encore lorsque l'on décrit seulement une petite partie d'un cycle T B F. Nous avons donc essayé de réaliser des montages simples permettant d'afficher sur l'écran d'un oscilloscope les courbes désirées.

I - LE REGULATEUR DE TEMPERATURE

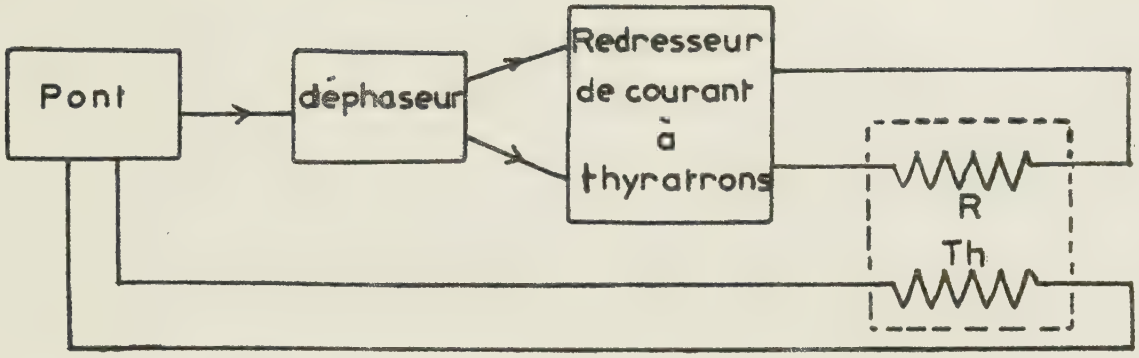
Des variations de quelques degrés seulement de la température ambiante peuvent provoquer une variation importante d'une capacité ferroélectrique. (Notons en passant que ce phénomène, gênant ici, pourrait donner lieu à des applications intéressantes. Il n'est pas exclu d'utiliser une céramique au lieu d'une thermistance pour stabiliser la température d'une enceinte). Par exemple, dans les mesures au Pont de Schéring décrites précédemment, une variation de température de l'ordre du degré pouvait donner lieu à une variation de l'ordre de 5 % de la capacité locale.

Nous nous proposons donc de réaliser un montage simple, maintenant constante à $\pm$ 0,1 degré C la température d'un bain d'huile de 0,5 dm^3 environ. Cette température doit pouvoir être affichée commodément entre 20º et 60º, par exemple. Il est important, pratiquement, de veiller à ce que le système régulateur ne rayonne pas un champ à 50 Hz sur la céramique.

1º/ Principe du régulateur (fig. 18)

Le bain d'huile est chauffé au moyen d'une résistance bobinée R. Si sa température est insuffisante, une thermistance plongée également dans l'huile, déséquilibre un pont d'impédances. Celui-ci envoie alors une tension d'erreur sous l'action de laquelle un générateur de courant à thyratrons se met à débiter

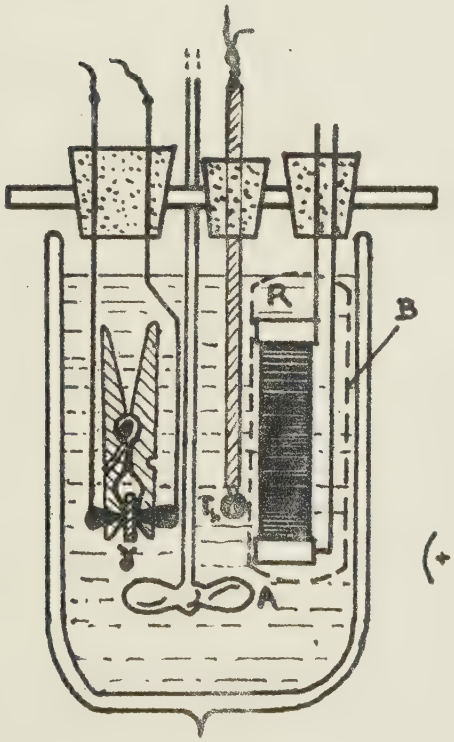
.../...



R = résistance chauffante.

TH = thermistance.

Fig 21. Bloc-diagramme du régulateur de la figure 22.



γ céramique
Th thermistance
R résistance chauffante
A agitateur
B blindage de R
(+ thermomètre près de γ)

Fig 23.

dans R jusqu'à ce que la température du bain soit la température affichée.

Le cerveau du régulateur est donc le pont de Wheastone qui est alimenté en courant alternatif, à la fréquence du secteur, au moyen d'un petit transformateur (fig. 19). La thermistance est notée T_h. R_3 est un potentiomètre monté en résistance variable. Les résistances R_1 et R_2 sont égales. On affiche une température θ en réglant R_3 pour que : $R_3 = T_h(\theta)$. A la température θ, la tension entre C et M est nulle. Selon que $t > \theta$ ou $t < \theta$, la tension recueillie entre C et M est soit en phase, soit en opposition de phase avec la tension du secteur.

Supposons maintenant que l'on applique sur l'anode d'un thyratron la tension du secteur, et sur sa grille la tension prise entre C et M. Ce thyratron restera bloqué si la tension d'erreur ainsi appliquée sur sa grille est en opposition de phase avec sa tension d'anode. Par contre, il pourra conduire au cours d'une demi-alternance sur deux si la tension d'erreur est en phase avec sa tension d'anode ; le courant d'anode pourra traverser la résistance R pour chauffer le bain d'huile (fig. 20).

2º/ Réalisation d'un régulateur simple (fig. 21)

Nous avons utilisé plusieurs variantes du dispositif de la figure. Nous donnons ci-dessous (fig. 22) le schéma d'un régulateur dans lequel deux thyratrons sont commandés en opposition de phase par la tension d'erreur, et également alimentés en opposition de phase à partir du réseau. Lorsqu'ils débitent, ils fonctionnent donc à la manière d'un redresseur à double alternance.

Nota : Les thyratrons ne débitent pas pendant toute une demi-période. En examinant le fonctionnement de près, on verrait que la régulation est continue (et non par "tout - ou - rien") si le bain d'huile dissipe suffisamment de chaleur.

La disposition des éléments dans le bain d'huile est représentée (fig. 23). La céramique γ , la résistance chauffante R, la thermistance T_h, et un thermomètre sont fixés sous une plaque de plexiglass. Lorsque la quantité d'huile est importante (un litre), il faut la placer dans un vase de Dewar.

II - REALISATION D'UN AMPLIFICATEUR T B F A TRES HAUTE TENSION DE SORTIE

1º/ Difficultés d'utilisation du tube amplificateur classique

Il est certainement possible de réaliser un tube amplificateur à faible débit et haute tension de sortie (4000 à 6000 volts crête à crête). Il suffirait de se contenter d'un gain faible, dû à l'écartement des électrodes. Pour obtenir d'un tel tube une tension de sortie symétrique par rapport à la masse, on pourrait utiliser une liaison par capacité - résistance.

Malheureusement, il n'existe pas dans le commerce de tube à faible débit, susceptible de travailler avec des tensions très élevées. Nous avons eu l'occasion de regretter cette lacune lors de la construction, à d'autres fins, d'amplificateurs de puissance à charge cathodique totale. Nous avons retenu

.../...

que le tube ECC 82 est encore utilisable (sans garantie du fabricant) avec une H T de 600 à 800 volts et qu'il peut convenir à l'étude de céraniques suffisamment minces. Les solutions restent donc nombreuses ; par exemple :

- on peut réduire l'épaisseur des céraniques. Le modulateur diélectrique décrit à la fin de cette étude utilise une céranique dont l'épaisseur est de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre (mais elle n'est pas uniforme).

- on peut aussi utiliser des tubes de puissance (par exemple, le tube EL 36 ou encore des tubes d'émission). Mais il faut alors disposer d'une alimentation stabilisée susceptible de fournir plusieurs dizaines de milliampères sous 3000 à 5000 volts.

- on peut encore se dispenser d'un amplificateur et utiliser des potentiomètres susceptibles de "tenir" une forte tension.

2º/ Amplification T H T par modulation et détection

Cependant, nous avons remarqué que les solutions coûteuses sont celles dans lesquelles la T H T subit des transformations après le détecteur. Nous avons donc réalisé de petits amplificateurs dans lesquels la tension d'attaque (de l'ordre du volt) est utilisée pour moduler une onde alternative de fréquence relativement élevée (15000 à 20000 Hz), après quoi cette onde subit une amplification de puissance, puis une amplification de tension et enfin la détection qui donne la T H T. Le bloc diagramme le plus simple d'un tel amplificateur est donné (fig. 24). Pour supprimer la composante continue introduite par l'amplificateur sans faire appel à une liaison R C (imposant une limite vers les basses fréquences) on peut utiliser le bloc diagramme suivant : fig. 25.
On voit ici que l'on utilise deux amplificateurs identiques à celà près que le second se termine par une détection négative. Ils sont modulés en opposition de phase. La tension de sortie est prise sur le point milieu d'une chaîne de résistances reliant les bornes de sortie non à la masse des deux amplificateurs. En pratique, l'utilisation de deux étages modulateurs fonctionnant en opposition de phase simplifie leur construction.

La réalisation des différents étages étant fort classique, nous donnons seulement les schémas (fig. 26 et 27) d'amplificateurs construits sur les bloc-diagrammes des fig. 24 et 25.

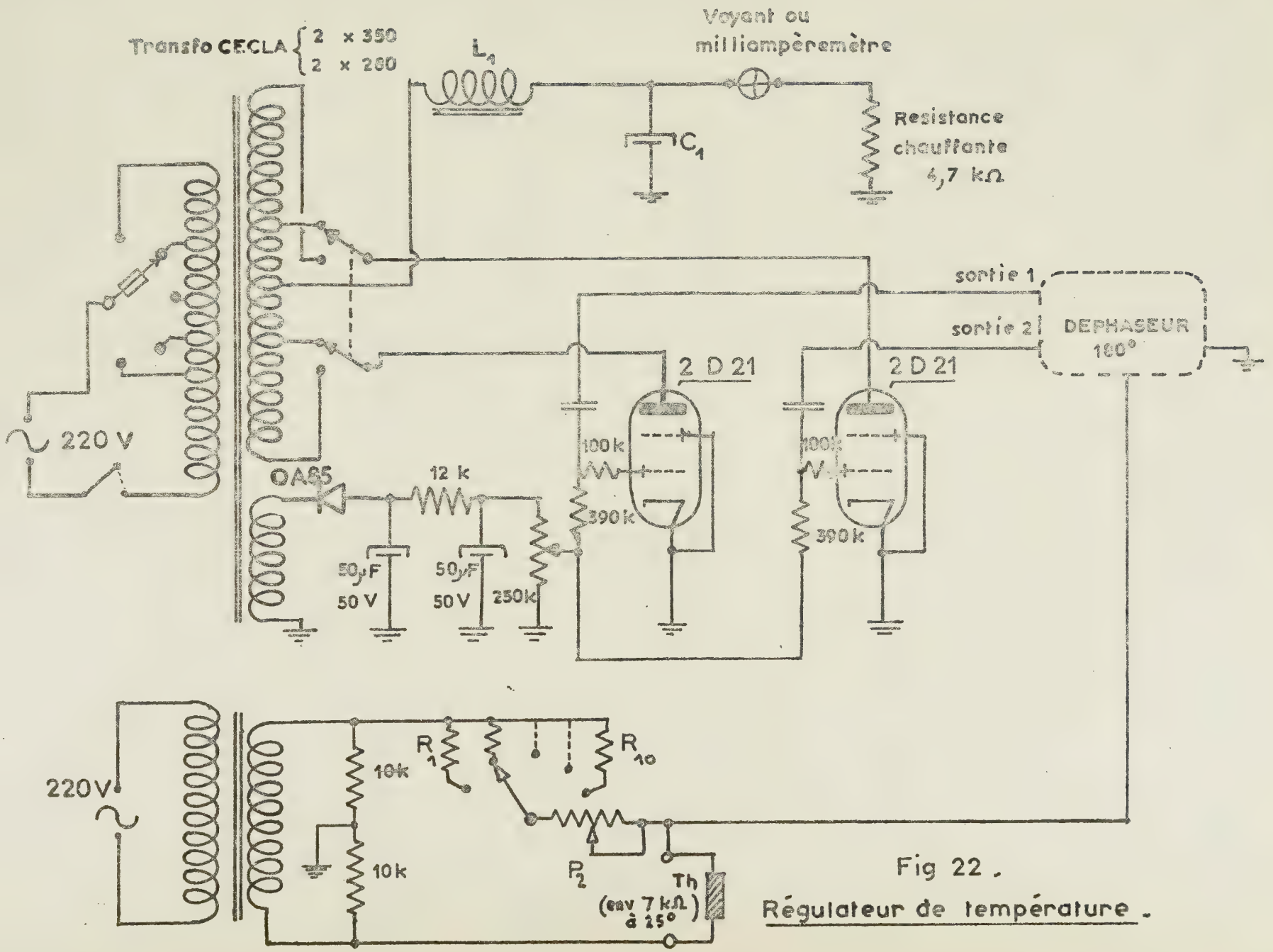


Fig 22 .

Régulateur de température .

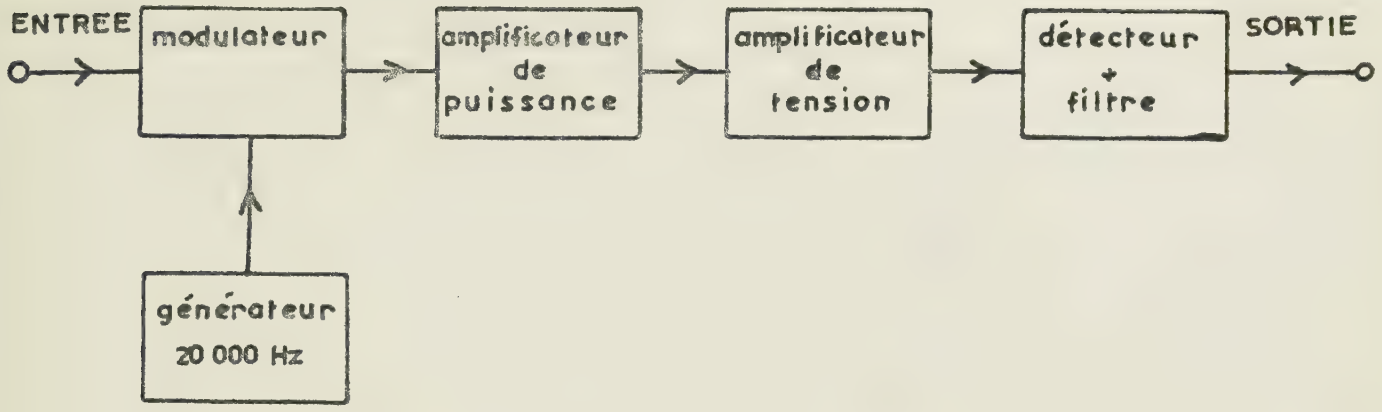


Fig 24_ Bloc-diagramme d'un amplificateur THT simple_

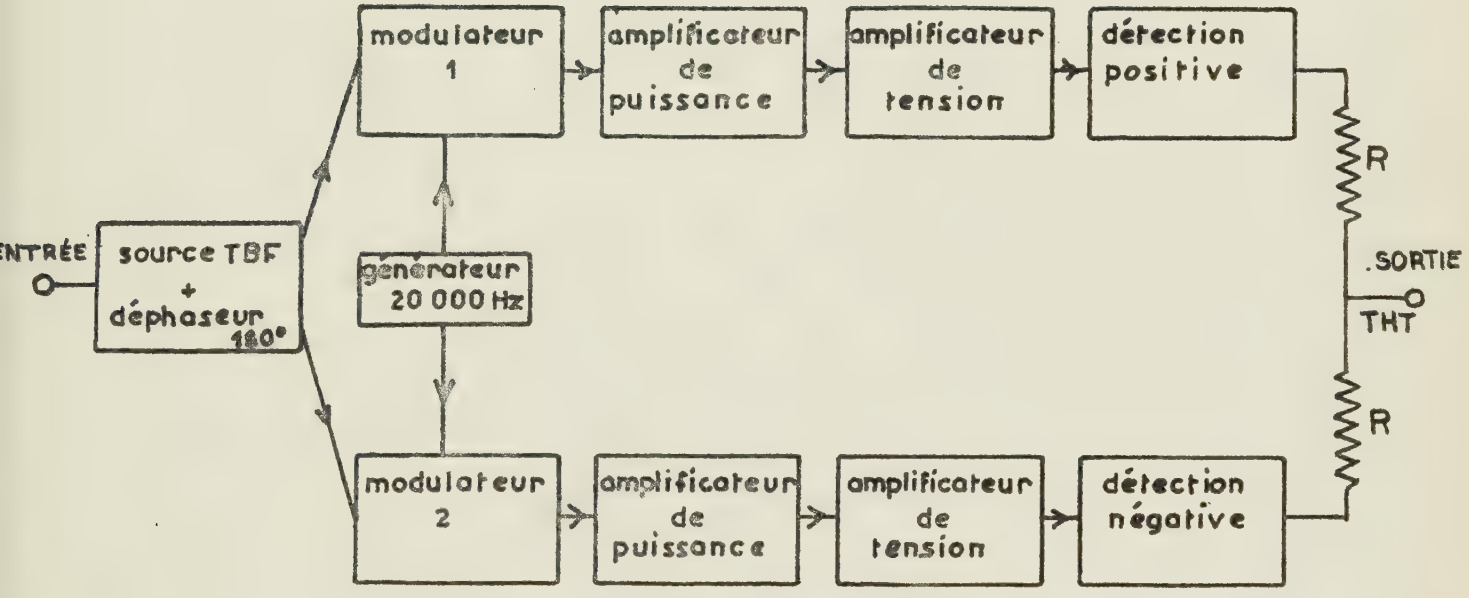


Fig 25_ Bloc-diagramme d'un amplificateur THT_

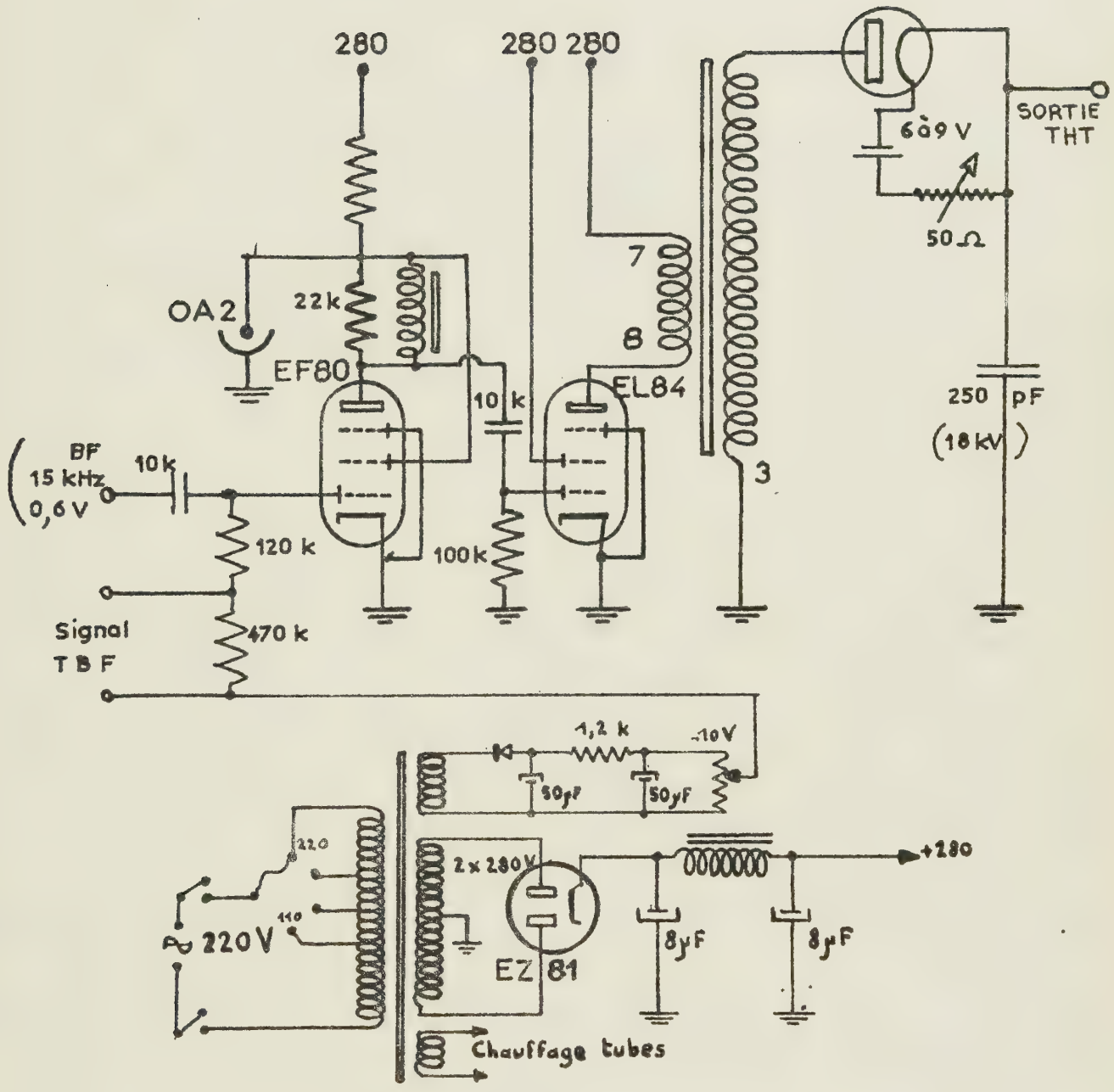


Fig 26 _ Amplificateur TBF à très haute tension de sortie.
(à composante continue)

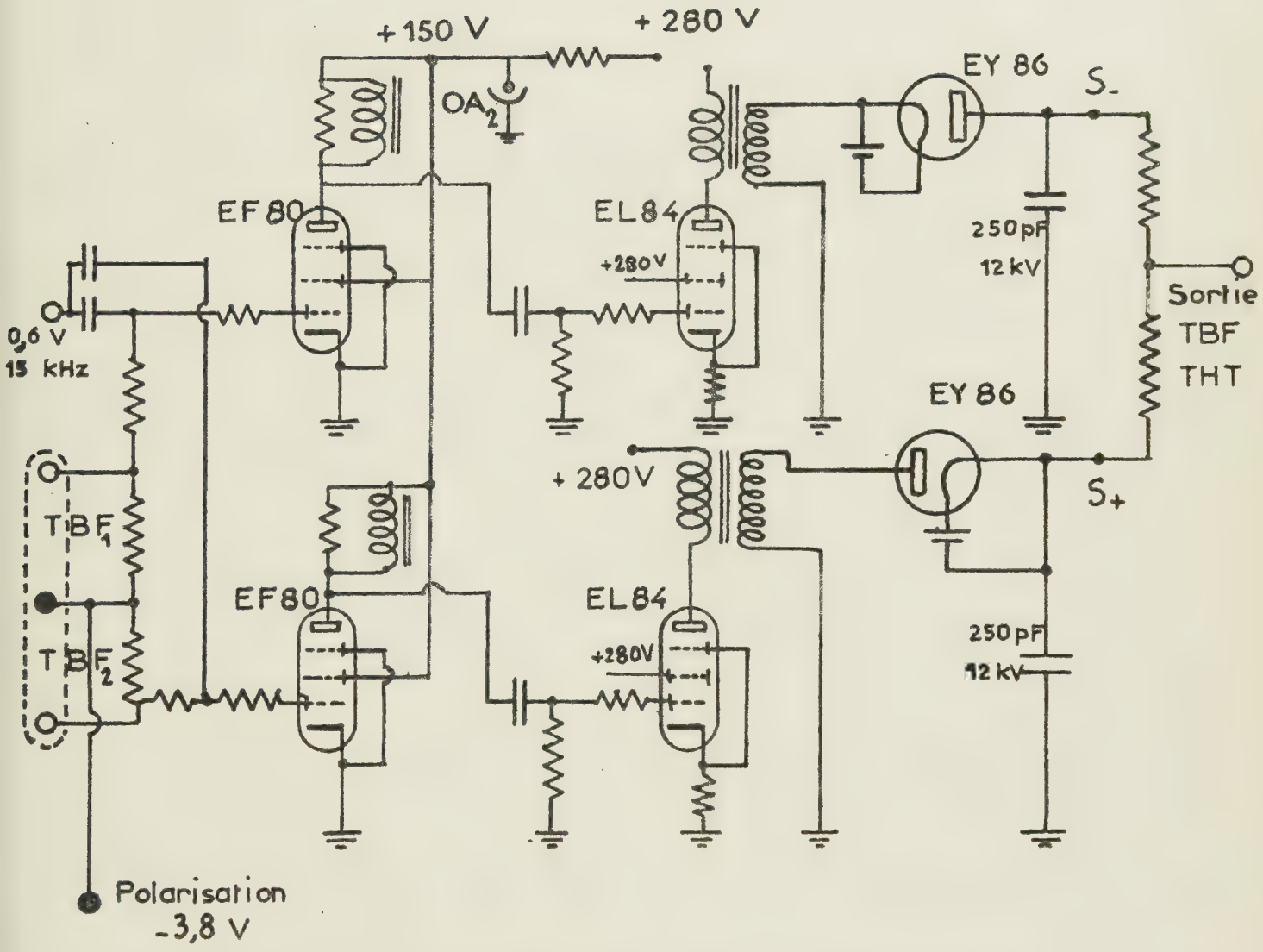


Fig 27_Amplificateur TBF à très haute tension de sortie_

Les entrées TBF_1 et TBF_2 reçoivent des signaux TBF en opposition de phase issus d'un générateur TBF.

CHAPITRE III

MESURES SYSTEMATIQUES

Nous pensons que la mesure la plus importante, pour le domaine d'application envisagée, est celle de la constante diélectrique locale. Les conditions de cette mesure doivent être précisées avec beaucoup de soin, le résultat étant fonction :

de la température

de l'amplitude et de la fréquence du cycle T B F au cours duquel la mesure est effectuée

du point de ce cycle où on se trouve

enfin de l'amplitude et de la fréquence de la tension utilisée pour la mesure.

D'autre part, il nous paraît intéressant de comparer ces courbes avec les cycles d'hystérésis classiques de Sawyer et Tower, tracés en très basse fréquence. Les manipulations effectuées nous ont permis de photographier plusieurs séries d'oscillogrammes.

a) Les clichés de la fig. 30 montrent l'évolution du cycle T B F avec la température, pour un domaine de températures entourant le point de Curie.

b) Les clichés des figures 34 à 55 montrent l'évolution du cycle de constante diélectrique locale pour un semblable domaine de températures.

c) Enfin, nous avons observé l'évolution de la capacité locale pour diverses variations de la tension T B F.

I - EVOLUTION D'UN CYCLE T B F AVEC LA TEMPERATURE

a) Le montage expérimental (fig. 28)

Le montage utilisé ne diffère pas dans son principe du montage de Sawyer et Tower. Mais au lieu d'utiliser une haute tension alternative obtenue

.../...

à partir du secteur grâce à un transformateur, on utilise une source alternative à très basse fréquence. Un générateur T B F à deux sorties symétriques est suivi par l'amplificateur T B F de la figure 27, décrit au chapitre II. A la sortie S de l'ensemble on a placé un filtre $RC_2C'_2$ coupant les fréquences supérieures à 15 000 Hz. (Fig. 28)

La gamme des fréquences utilisables est limitée, du côté des fréquences élevées, par le temps de charge des capacités C_1 C'_1 C_2 C'_2, du côté des fréquences basses, par la décharge de la capacité C_o à travers la résistance d'entrée de l'amplificateur de déviation verticale de l'oscilloscope. La première limitation ne nous paraît pas très gênante, car nous avons d'autres manipulations en vue pour étudier l'évolution du cycle avec la fréquence. Mais la seconde est plus grave. Elle empêche la description de cycles en-dessous de la fréquence définie par :

$$f_o = \frac{1}{R_e \times C_o}$$

Nous avons augmenté R_e au maximum compatible avec le gain de l'amplificateur vertical de l'oscilloscope. Pour utiliser des fréquences plus basses, il faut adjoindre un amplificateur vertical, et prendre de très grandes précautions de câblage, car les circuits à haute impédance d'entrée sont très sensibles aux inductions du secteur. Nous donnons les courbes obtenues à la fréquence de 0,25 Hz. L'influence de la décharge de C_o dans R est alors à peine sensible sur les oscillogrammes. A fréquence plus basse, on observerait des oscillogrammes analogues à celui de la figure 29 b.

b) Les résultats

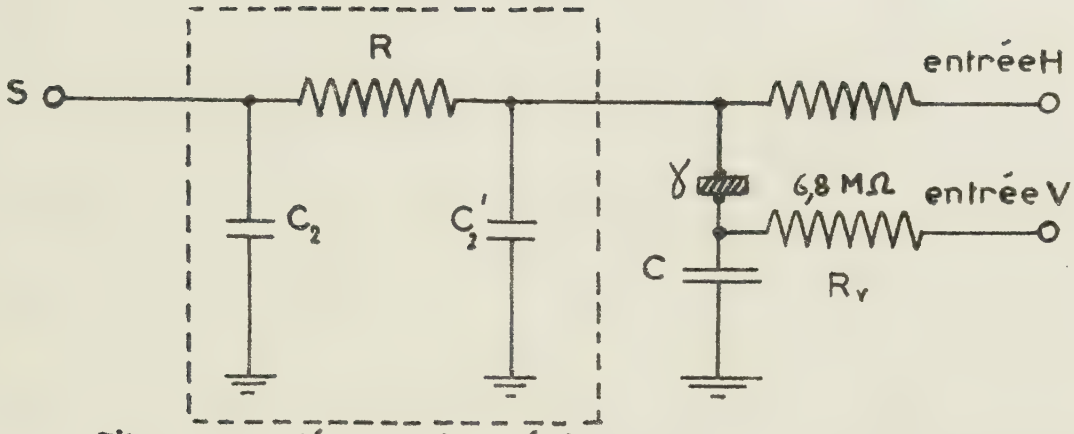
Nous avons suivi l'évolution d'un cycle de très basse fréquence (0,25 H à différentes températures entourant le point de Curie. L'échantillon ferro-électrique utilisé est une solution solide $(Ba_{0,75}\ Sr_{0,25})$. Il se présente sous la forme d'une pastille de 9,36 mm de diamètre et 2,44 mm d'épaisseur. Il est immergé dans un bain d'huile dont la température est régulée par l'appareil décrit au chapitre II (fig. 22). La très haute tension chargée de décrire le cycle est une tension en dents de scie évoluant entre les extrema : - 1600 volts et + 1600 volts.

Sur les diagrammes obtenus (fig. 30), nous voyons donc qu'il faut distinguer deux régions :

- une région d'hystérésis au-dessous du point de Curie où la céramique ferroélectrique se comporte comme un condensateur à pertes

- une région sans hystérésis au-dessus du point de Curie.

.../...



Filtre pour l'ondulation résiduelle.

. Fig 28 .

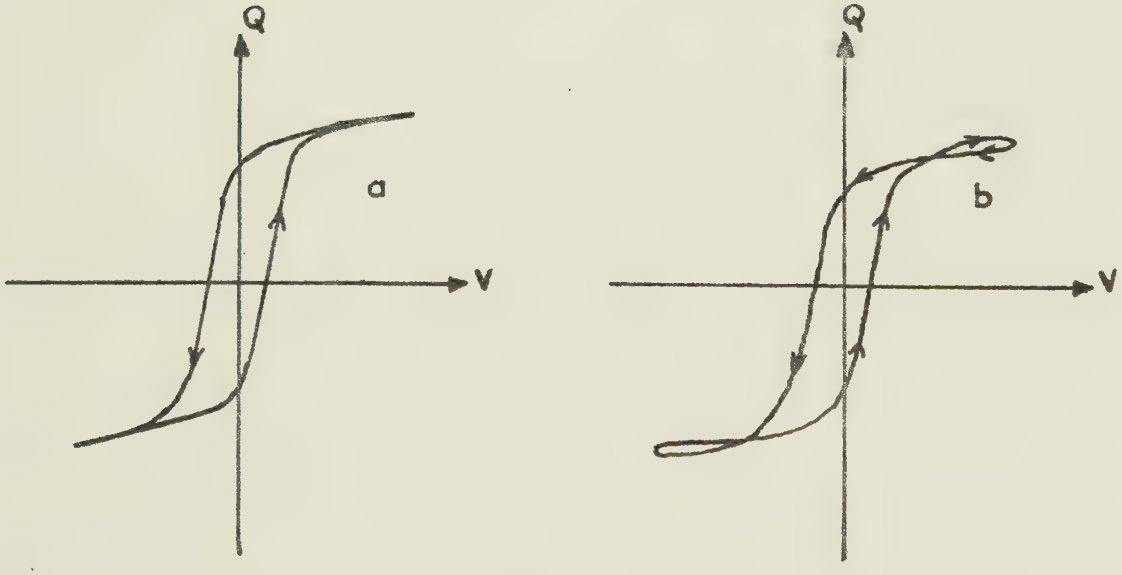


Fig 29. a/oscillogramme correct
b/ constante de temps $R_v C$ trop faible.

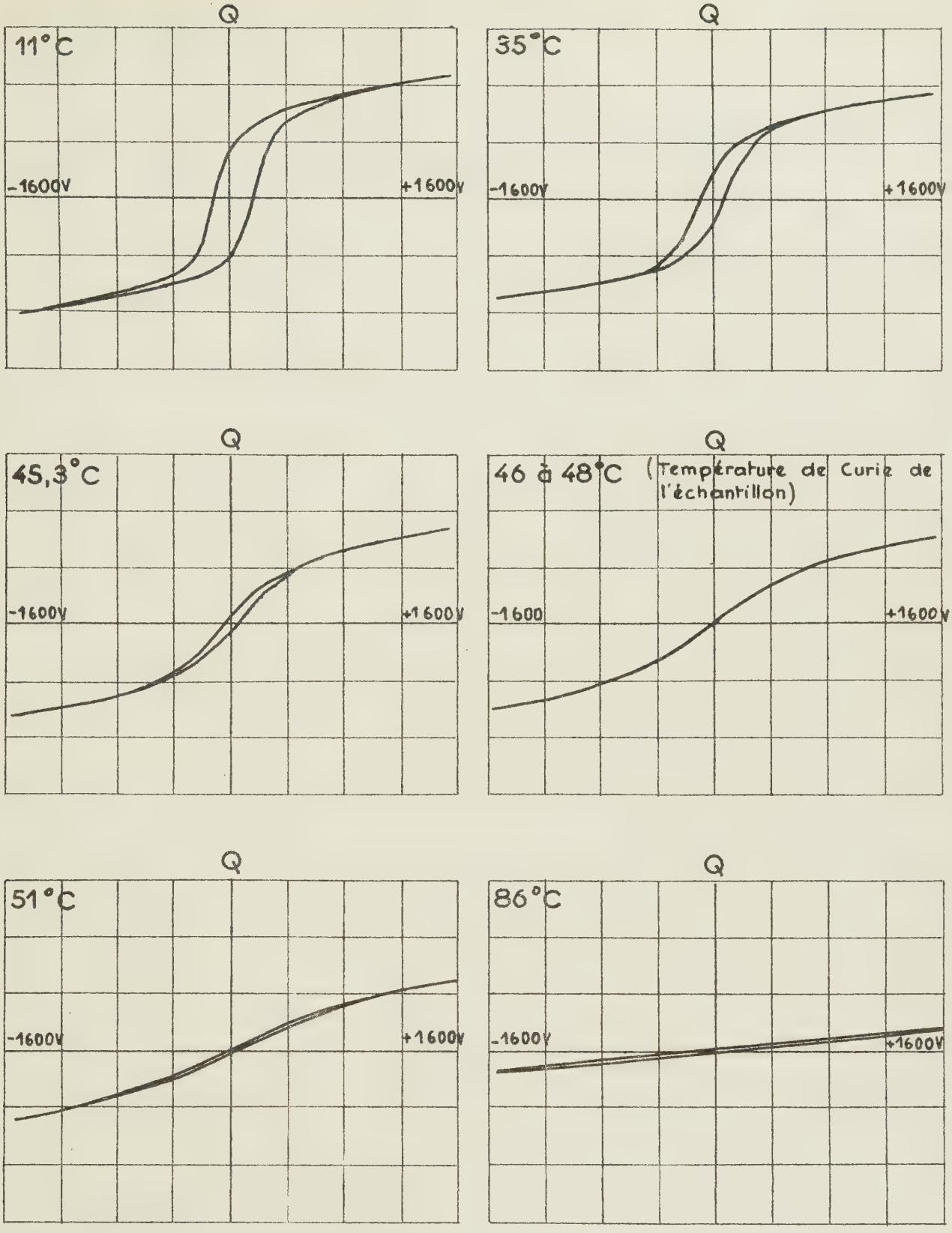


Fig 30 Evolution d'un cycle d'hystérésis T B F (0,25 Hz) au voisinage du point de Curie

II - EVOLUTION DU CYCLE DE CAPACITE LOCALE AVEC LA TEMPERATURE ET LA FREQUENCE DE LA TENSION LOCALE

a) Le montage

Nous nous proposons d'afficher le cycle de capacité locale sur l'écran d'un oscilloscope. Nous ferons varier :

- la température
- la fréquence et l'amplitude de la tension locale.

Pour afficher le cycle de capacité locale, nous devrons appliquer sur l'entrée H de l'oscilloscope une fraction de la tension de polarisation (T B F) de la céramique. Nous appliquerons à l'entrée V une tension proportionnelle à la capacité locale. Pour obtenir cette dernière tension, remarquons que si l'on place en série une capacité γ et une résistance r (fig. 31) et si l'on maintient aux bornes de l'ensemble une tension alternative d'amplitude constante v_o et de pulsation ω, on recueille aux bornes de r une tension alternative dont l'amplitude est :

$$v = v_o \frac{r}{\sqrt{r^2 + \frac{1}{\gamma^2 \omega^2}}}$$

Si l'on prend $r \ll \frac{1}{\gamma \omega}$, on a $v \simeq v_o r \gamma \omega$

Si l'on s'arrange pour maintenir constant le produit $r\omega$, lorsque l'on fait varier la fréquence, v est proportionnelle à la capacité γ. En détectant linéairement cette tension alternative, on dispose d'une tension continue proportionnelle à la capacité γ. Nous appliquerons donc à l'entrée d'un détecteur la tension alternative recueillie aux bornes d'une résistance r placée en série avec la céramique et la source de tension T.B.F. La tension détectée sera appliquée à l'entrée V de l'oscilloscope.

Le détecteur représenté figure 32 comprend :

- un étage amplificateur de tension
- un étage à basse impédance de sortie
- le détecteur proprement dit, du type résistance et diode en parallèle, fréquemment utilisé par les constructeurs de voltmètres électroniques.
- un filtre éliminant l'ondulation résiduelle à la fréquence locale.

La figure 33 est un bloc diagramme du montage utilisé pour l'affichage du cycle de capacité locale.

b) Les oscillogrammes obtenus

Nous avons tracé les cycles de capacité locale à différentes températures. Les oscillogrammes rapportés aux figures suivantes (34 à 55) montrent leur évolution au voisinage de la température de Curie. (25° C ; 35° C ; 46° C ;

Au-delà de la température de Curie, la variation de capacité locale devient négligeable, et l'on observe sur l'écran un segment de droite horizontal.

Pour une fréquence et une amplitude données de la tension locale, on remarque :

- la disparition de l'hystérésis à la température de Curie
- la linéarité des cycles de capacité locale à la température de Curie.

Cependant, la pente du cycle de capacité locale présente des valeurs plus importantes aux températures inférieures : on peut comparer à ce sujet les cycles obtenus avec une tension locale de (500 Hz ; 20 volts) aux températures de 25º C ; 35º C ; 46º C.

Si l'on fait varier la fréquence de la tension locale, on constate qu'au point de Curie, cette variation reste sans importance dans le domaine de fréquences utilisé (500 Hz à 20 000 Hz). Aux températures inférieures à la température de Curie, la variation relative de capacité est d'autant plus grande que la fréquence est plus faible.

L'amplitude de la tension locale n'est pas sans importance. Le choix de l'amplitude paraît même assez critique si l'on veut obtenir, en-dessous de la température de Curie, une variation importante de la capacité locale. Si l'on se place à la température de Curie, ce choix perd son importance.

c) Utilisation d'une "portion" de cycle de capacité locale

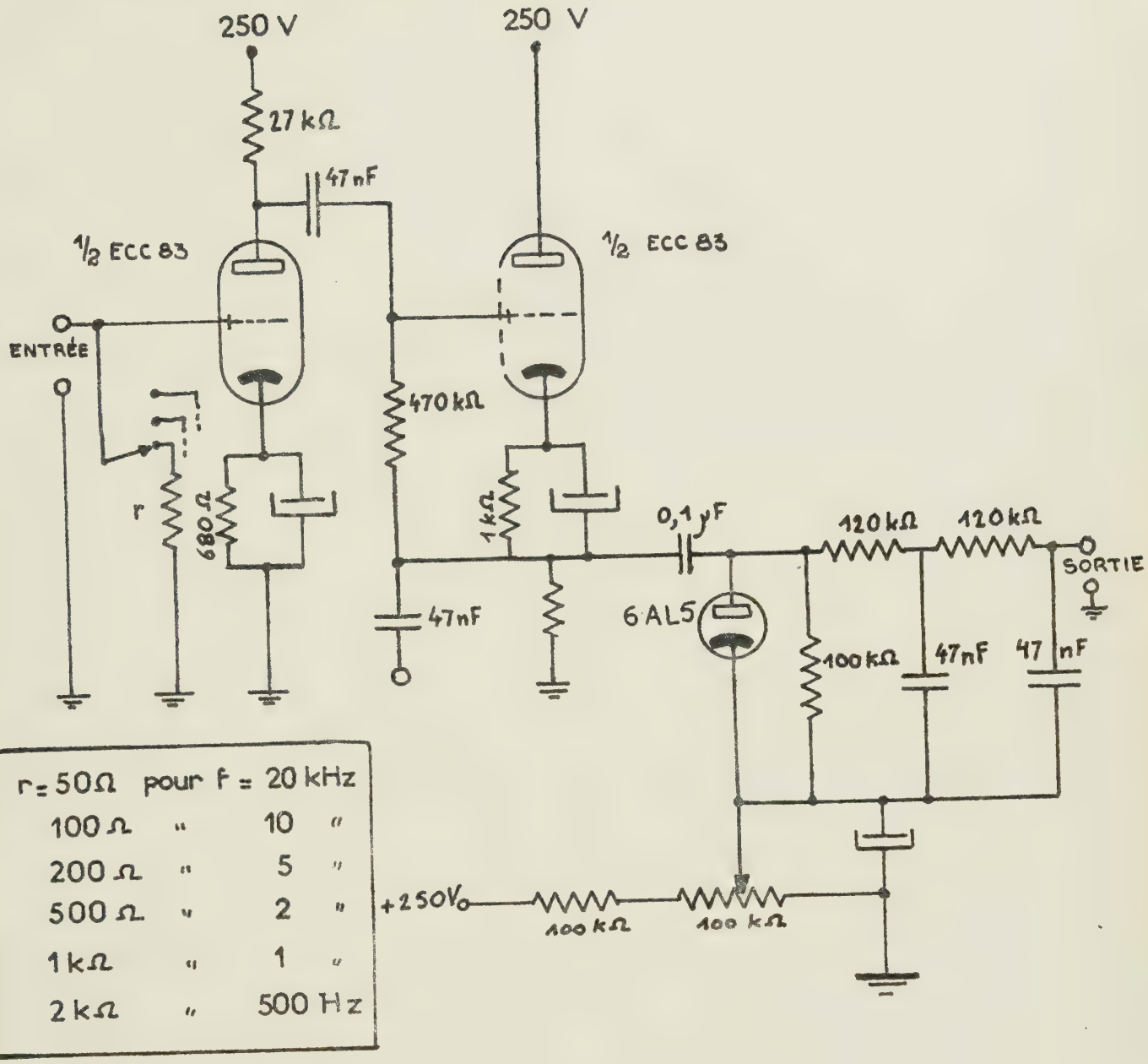
La figure 56 montre ce que l'on observe sur l'écran de l'oscilloscope lorsque les valeurs décrites par la tension de polarisation T B F demeurent strictement positives.

A la température de Curie, la courbe obtenue n'est qu'une partie du cycle de capacité locale.

d) Conclusions pratiques

Si l'on veut utiliser la variation de capacité locale en fonction de la tension de polarisation, la solution la plus simple consiste à travailler à la température de Curie. On bénéficie alors :

- d'une variation importante de la capacité locale avec la tension de polarisation
- d'une grande linéarité de cette variation
- de l'absence d'hystérésis. A la température de Curie, la capacité locale ne dépend plus de l'"histoire" du ferroélectrique. Par conséquent, il est inutile de cycler l'échantillon pour lui trouver des propriétés définies.



r = 50 Ω	pour	f = 20 kHz
100 Ω	"	10 "
200 Ω	"	5 "
500 Ω	"	2 "
1 kΩ	"	1 "
2 kΩ	"	500 Hz

_ Fig 32 _ Schéma du détecteur _

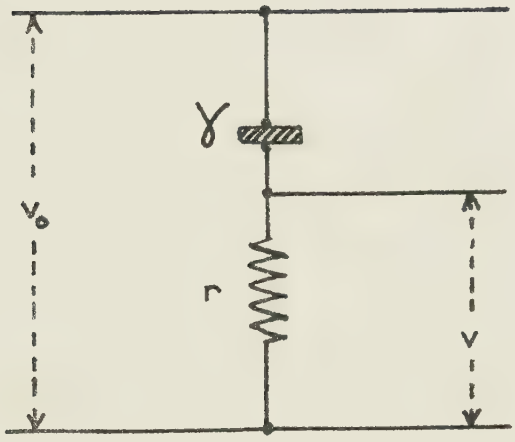


Fig 31

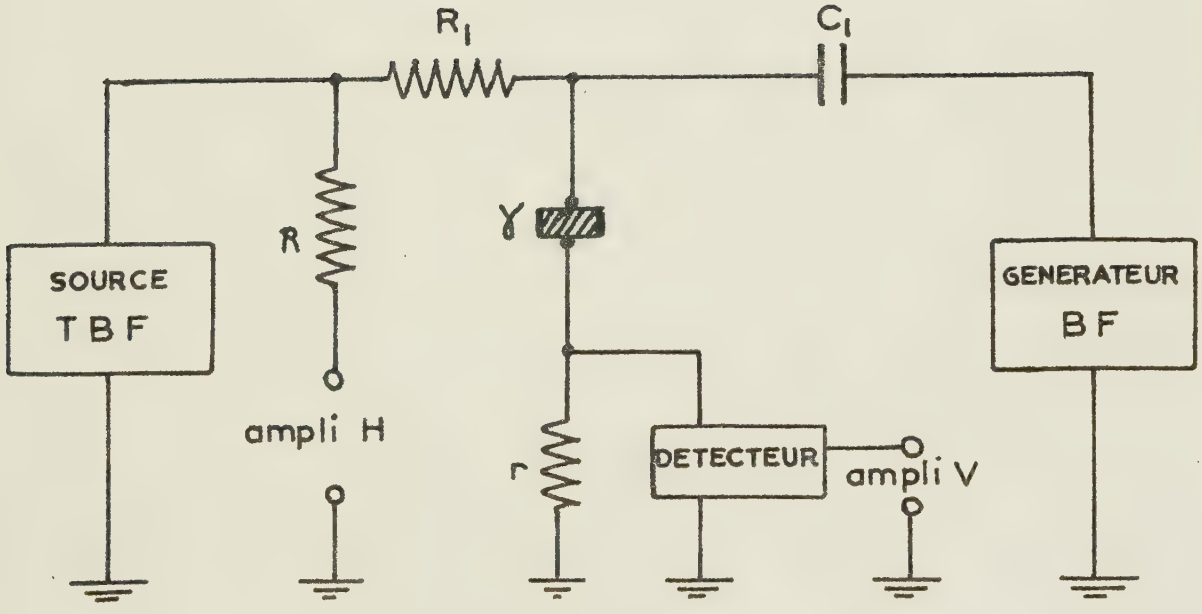


Fig 33 _ Affichage des cycles de capacité locale _

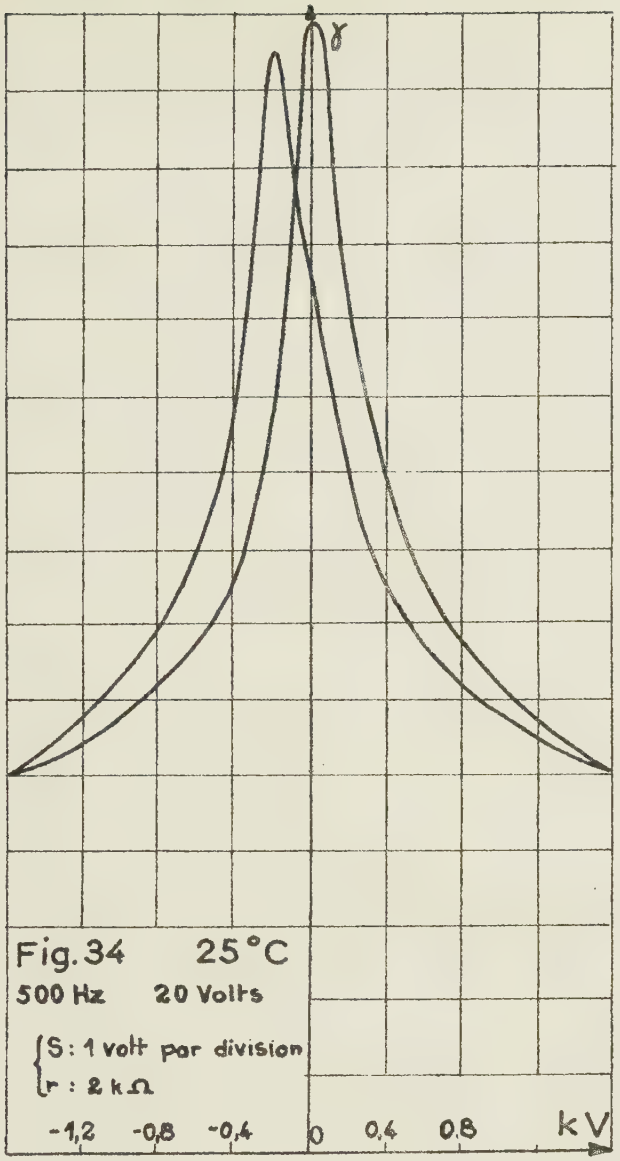


Fig. 34 25 °C
500 Hz 20 Volts
{S : 1 volt par division
{r : 2 kΩ

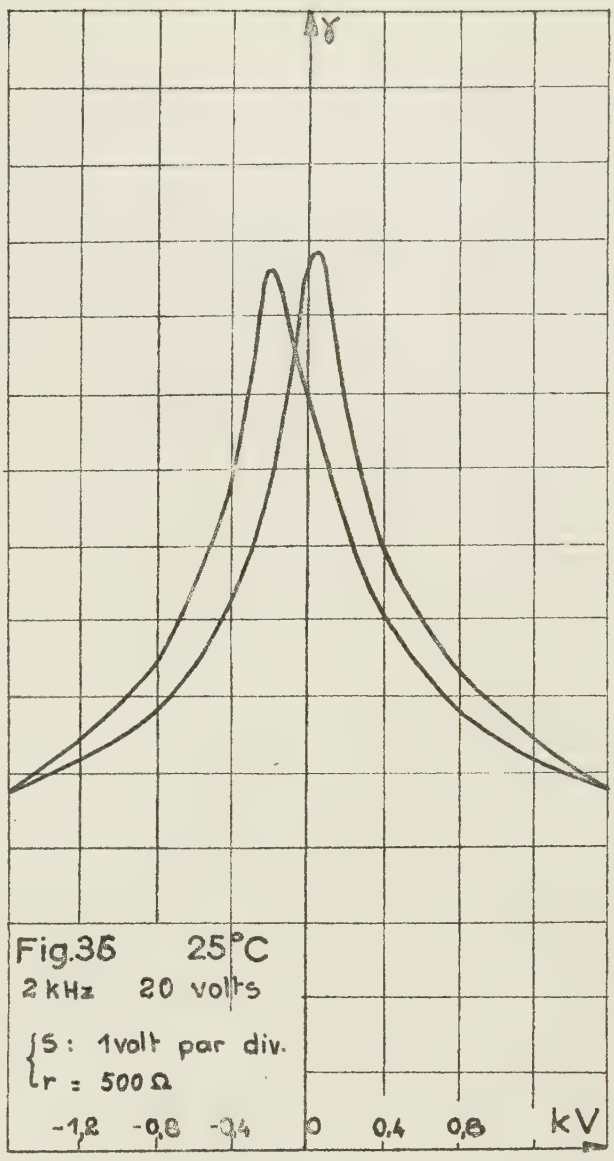


Fig. 36 25 °C
2 kHz 20 volts
{S : 1 volt par div.
{r = 500 Ω

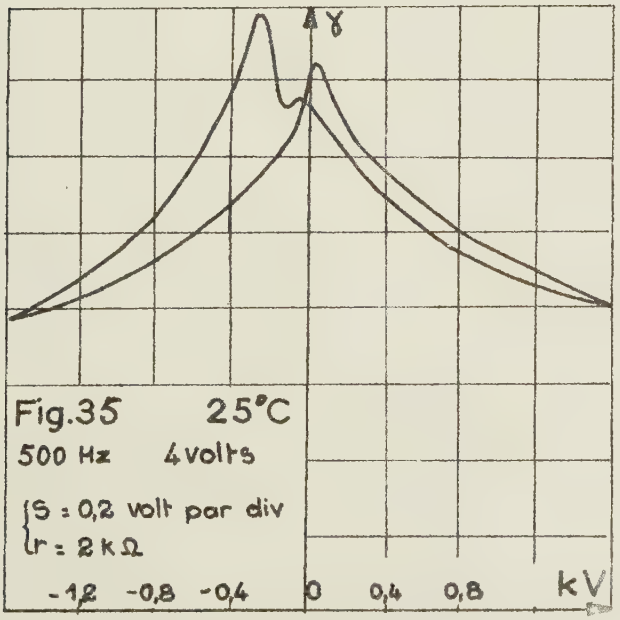


Fig. 35 25 °C
500 Hz 4 volts
{S = 0,2 volt par div
{r = 2 kΩ

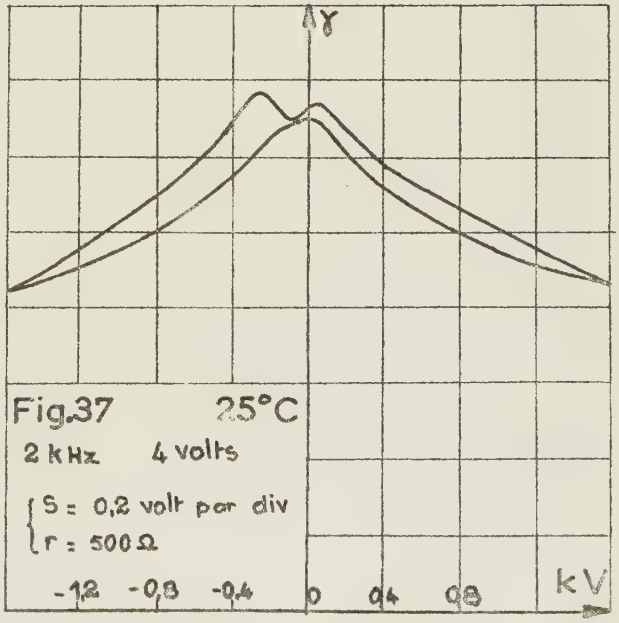


Fig. 37 25 °C
2 kHz 4 volts
{S = 0,2 volt par div
{r = 500 Ω

S : sensibilité de l'oscilloscope, en volts par division

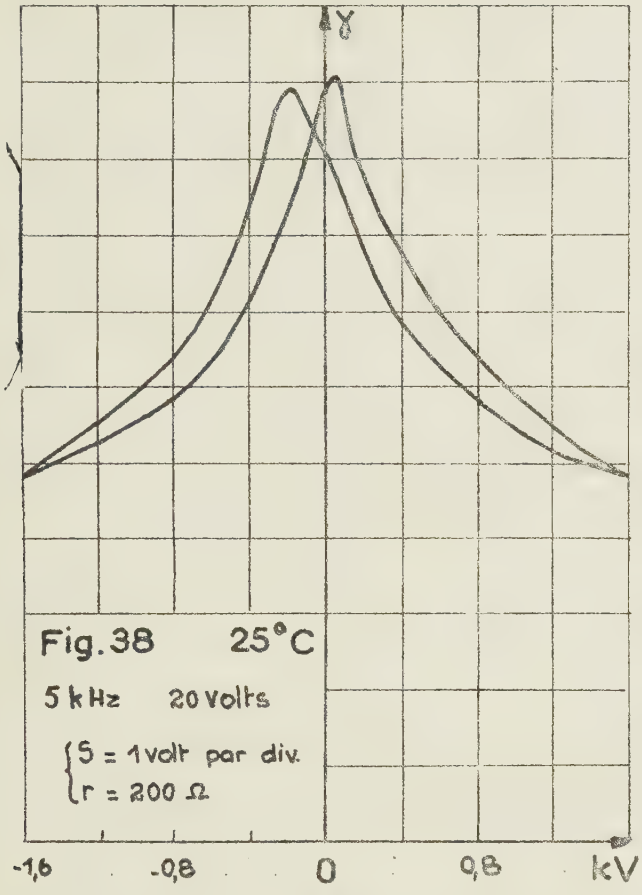


Fig. 38 25°C
5 kHz 20 volts
{S = 1 volt par div.
{r = 200 Ω

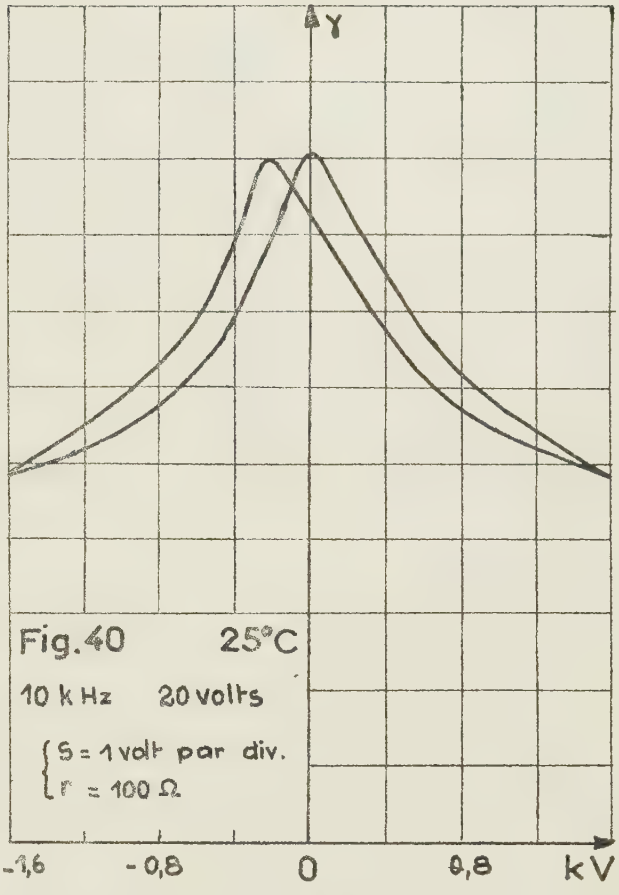


Fig. 40 25°C
10 kHz 20 volts
{S = 1 volt par div.
{r = 100 Ω

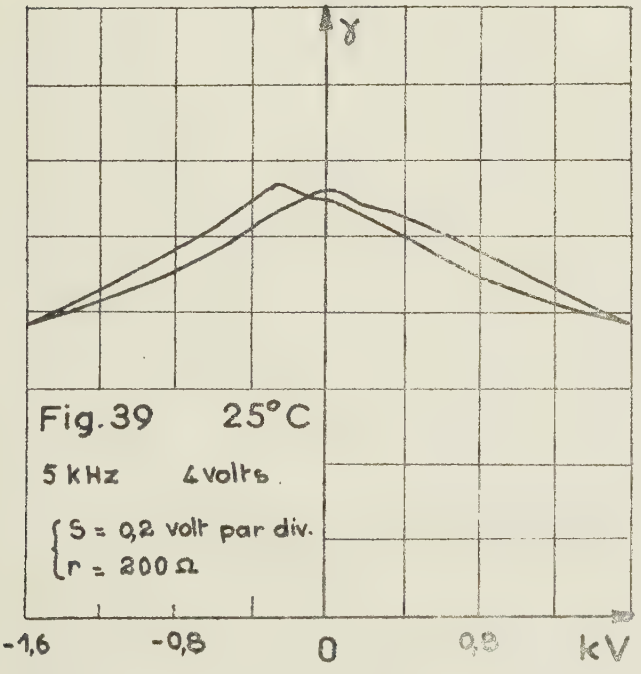


Fig. 39 25°C
5 kHz 4 volts
{S = 0,2 volt par div.
{r = 200 Ω

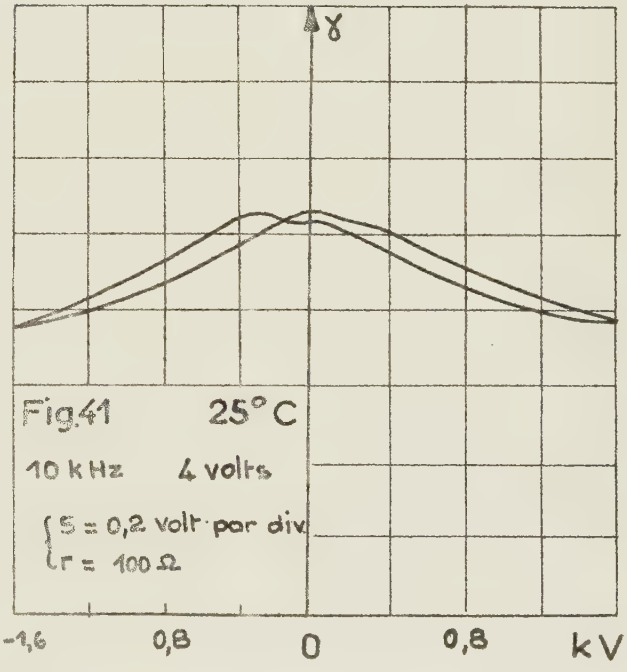


Fig. 41 25°C
10 kHz 4 volts
{S = 0,2 volt par div.
{r = 100 Ω

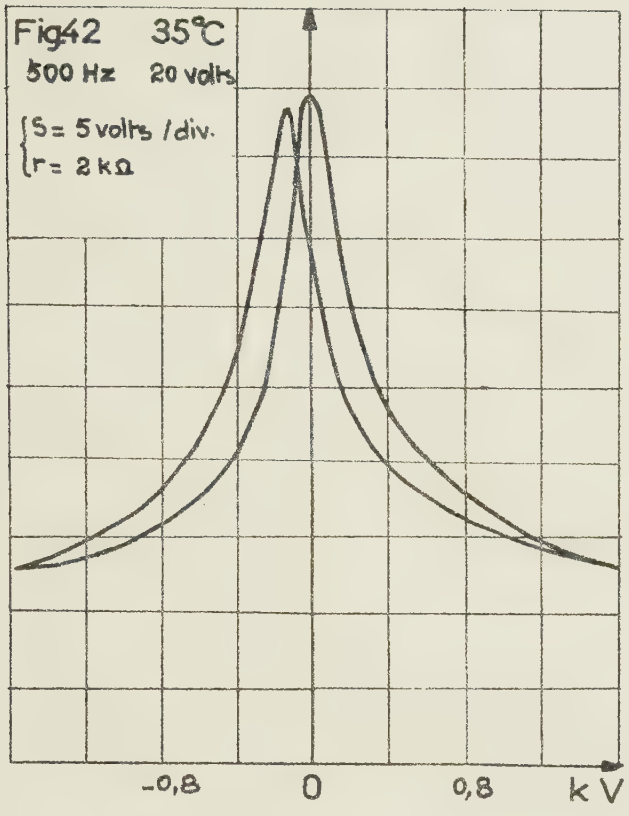


Fig.42 35°C
500 Hz 20 volts
S = 5 volts / div.
r = 2 kΩ
-0,8
0
0,8
kV

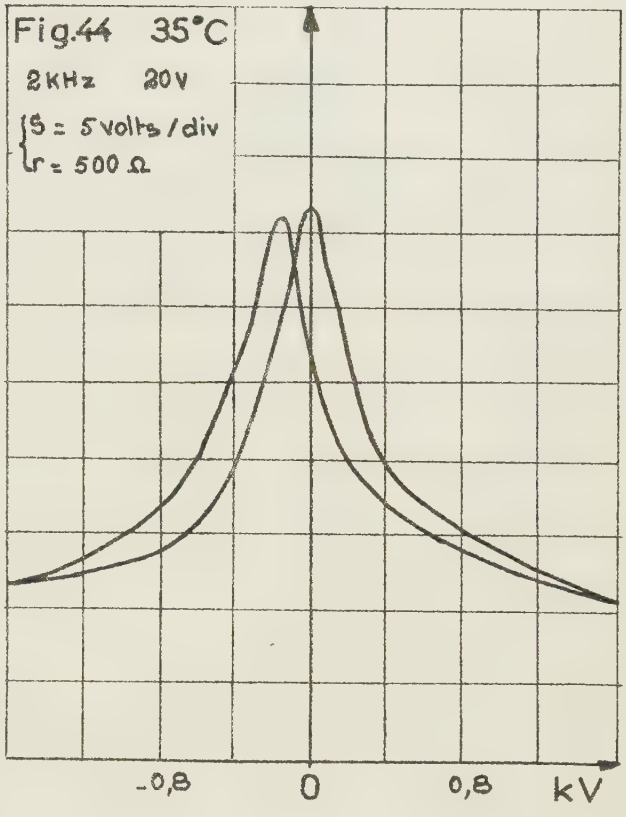


Fig.44 35°C
2 KHz 20 V
S = 5 volts / div
r = 500 Ω
-0,8
0
0,8
kV

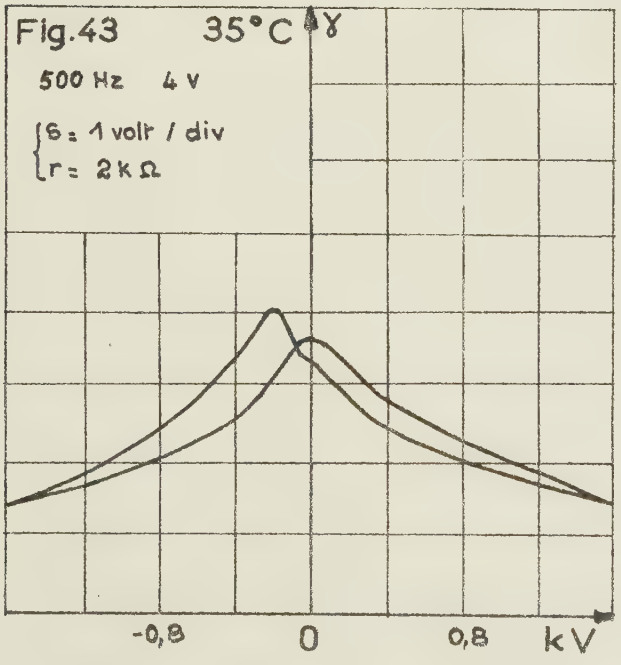


Fig.43 35°C
500 Hz 4 V
S = 1 volt / div
r = 2 kΩ
Y
-0,8
0
0,8
kV

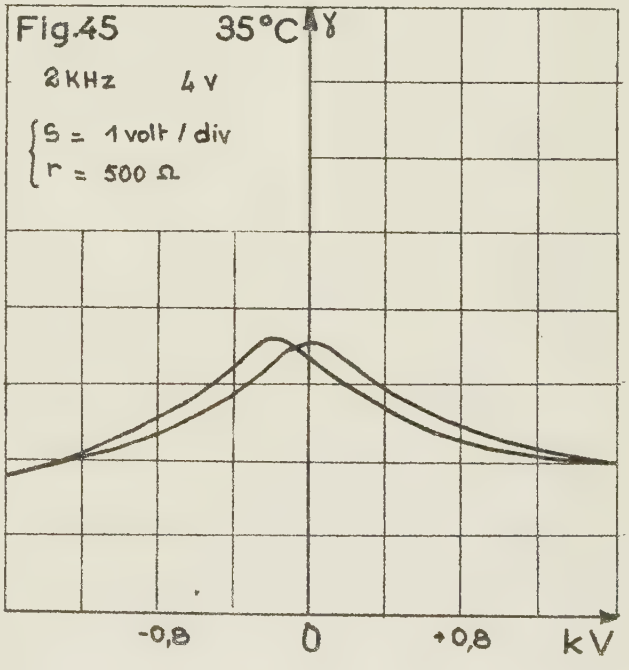


Fig.45 35°C
2 KHz 4 V
S = 1 volt / div
r = 500 Ω
Y
-0,8
0
+0,8
kV

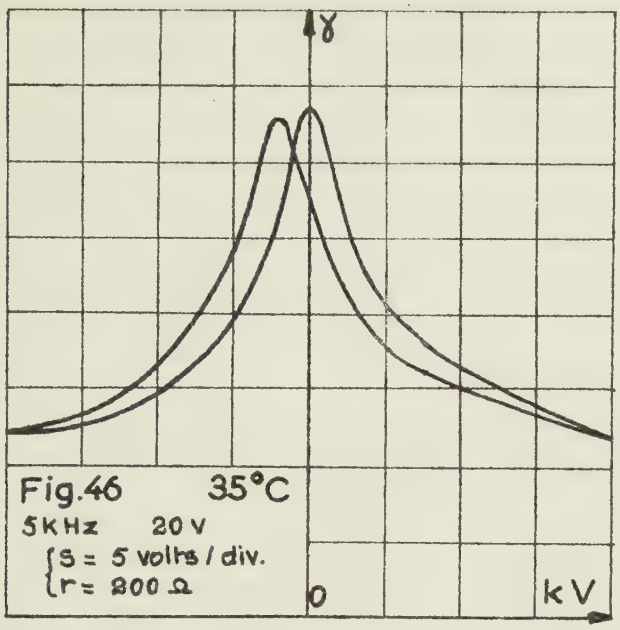


Fig.46 35°C
5 KHz 20 V
{S = 5 volts / div.
{r = 200 Ω

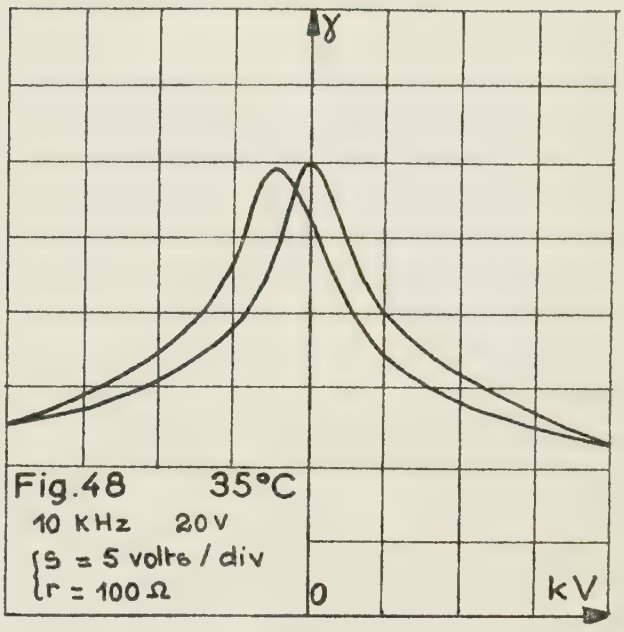


Fig.48 35°C
10 KHz 20 V
{S = 5 volts / div
{r = 100 Ω

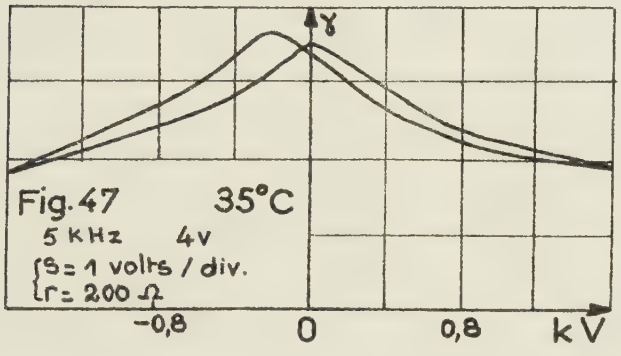


Fig.47 35°C
5 KHz 4 V
{S = 1 volts / div.
{r = 200 Ω

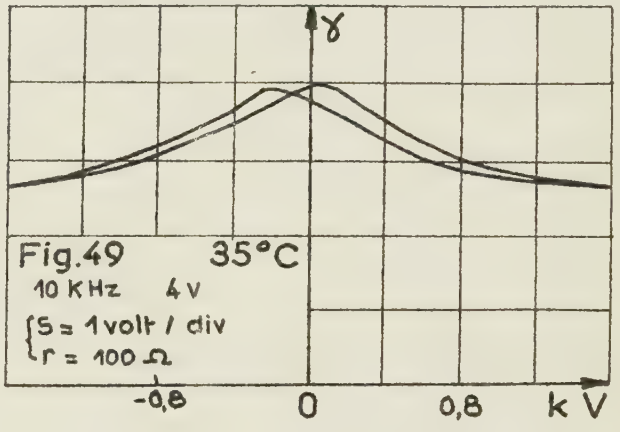


Fig.49 35°C
10 KHz 4 V
{S = 1 volt / div
{r = 100 Ω

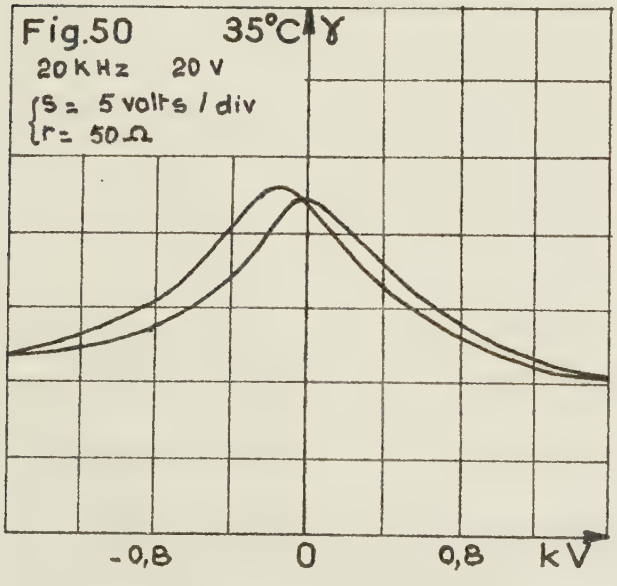


Fig.50 35°C
20 KHz 20 V
{S = 5 volts / div
{r = 50 Ω

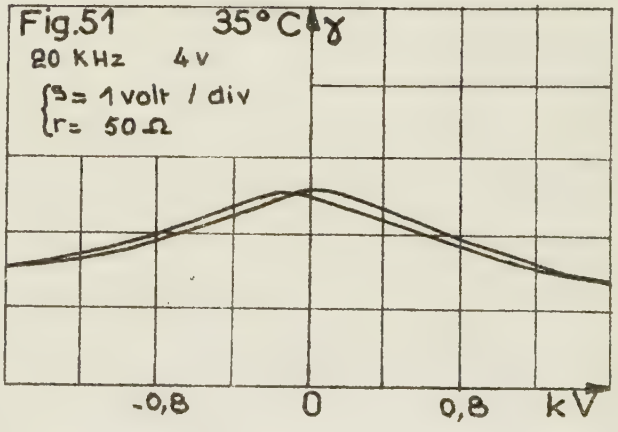


Fig.51 35°C
20 KHz 4 V
{S = 1 volt / div
{r = 50 Ω

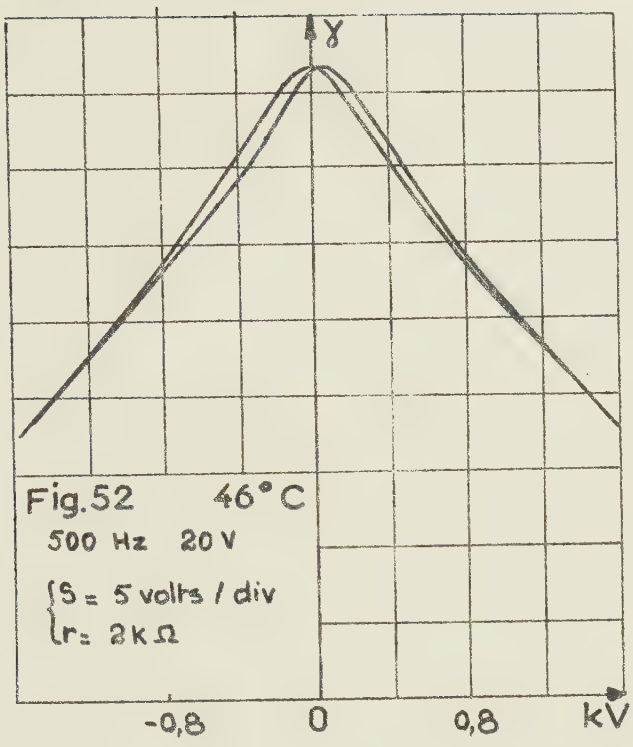


Fig.52 46°C
500 Hz 20 V
{S = 5 volts / div
{r = 2 kΩ

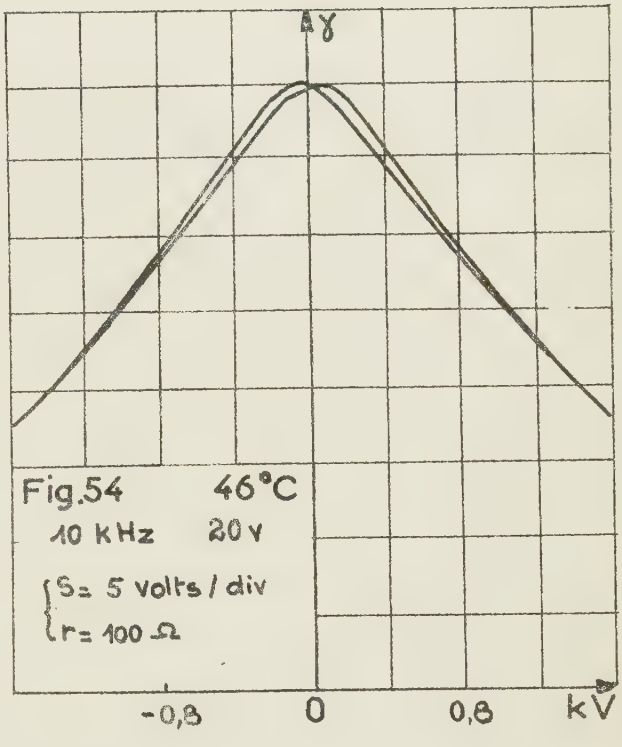


Fig.54 46°C
10 kHz 20 V
{S = 5 volts / div
{r = 100 Ω

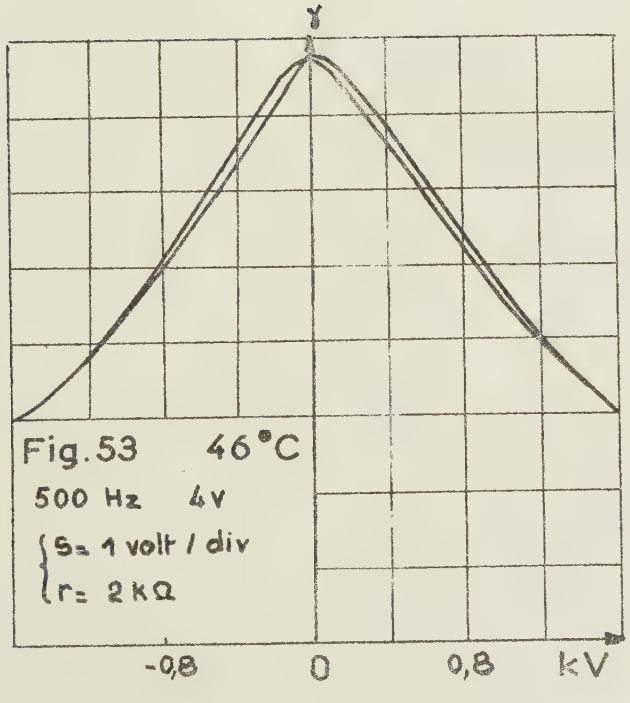


Fig.53 46°C
500 Hz 4 V
{S = 1 volt / div
{r = 2 kΩ

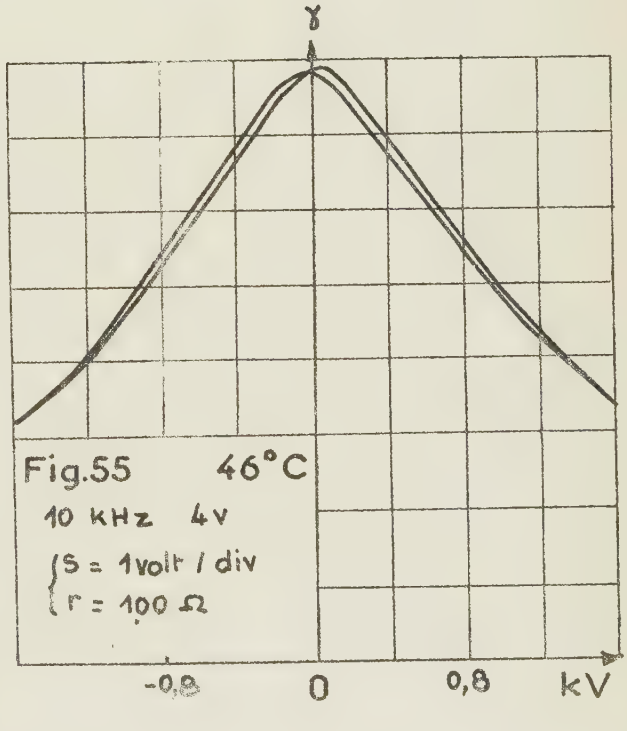


Fig.55 46°C
10 kHz 4 V
{S = 1 volt / div
{r = 100 Ω

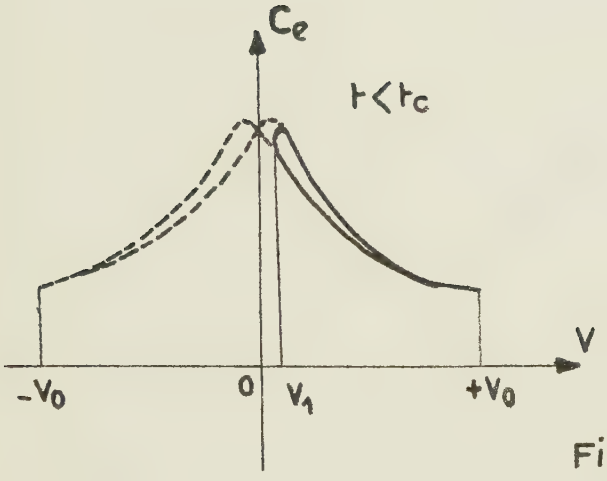
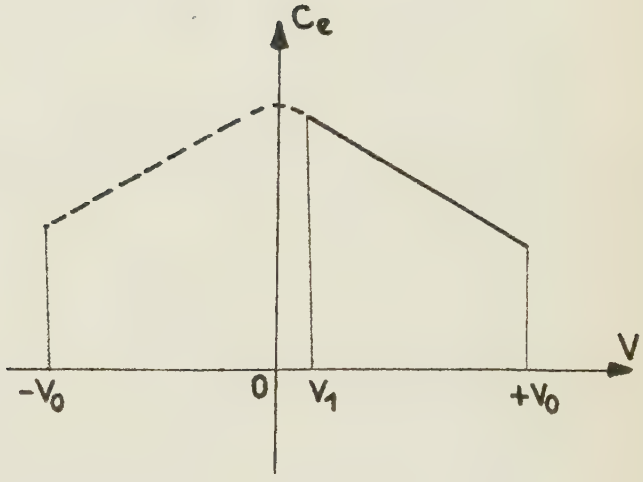


Fig.56



CHAPITRE IV

INTERPRETATION QUALITATIVE DU PHENOMENE D'HYSTERESIS

Les résultats obtenus aux chapitres I et III sont trop partiels pour permettre de donner une interprétation théorique quantitative.

Cependant, un modèle théorique simple, même imparfait, rend pratiquement de très grands services, tant pour l'enregistrement des résultats que pour la préparation de nouvelles manipulations. Nous nous proposons donc, dans ce chapitre, de décrire brièvement les modèles qui nous paraissent les plus aptes à interpréter les phénomènes observés.

I - STRUCTURE D'UNE CERAMIQUE EN MONOCRISTAUX ELEMENTAIRES

Une céramique est composée d'un grand nombre de petits monocristaux élémentaires, rigidement soudés entre eux. Les dimensions de ces monocristaux, et leur nombre par unité de volume, dépendent des traitements mécaniques subis au cours de la fabrication. Nous conviendrons de raisonner, en première approximation, sur des monocristaux cubiques, d'arête D, disposés au hasard, à raison de N monocristaux par unité de volume : Kittel (10) prend : $D = 10^{-2}$ cm, dans le cas du titanate de Barium pur.

II - THEORIE DES DOMAINES DE POLARISATION SPONTANEE

La forme des cycles d'hystérésis observés aux fréquences basses n'est pas sans rappeler les cycles : $B = f(I)$ (B : induction magnétique ; I = intensité d'aimantation) des corps ferromagnétiques. Une telle ressemblance est probablement due à l'analogie des modes de déplacement de domaines cristallins de polarisation spontanée.

Les travaux de P. Weiss en 1907 ont montré qu'une substance ferromagnétique est divisée en domaines spontanément polarisés à saturation. Quand la substance n'est pas aimantée, les domaines ont des orientations différentes réparties au hasard, et l'aimantation macroscopique observable de l'échantillon est nulle.

.../...

Un tel phénomène se produit également avec les céramiques ferroélectriques ; la ferroélectricité apparaît donc comme liée essentiellement à la structure de domaines du matériau.

a) Polarisation d'une molécule

La structure de la maille élémentaire de titanate mixte de Ba et de Sr peut être cubique ou quadratique dans la gamme de températures utilisées (voisines de la température ambiante).

La figure 57, d'après Känzig et Evans montre un état cubique (a) et deux états quadratiques (b et c) d'une même maille cristalline Ces deux états diffèrent essentiellement par la position de l'ion Ti. C'est seulement dans la phase quadratique que la mole présente une polarisation spontanée, les barycentres des charges positives et négatives ne coïncidant plus.

Nous admettrons que le long d'un de ses axes de polarisation spontanée, l'ion Ti ne peut occuper que trois positions :

- la position centrale (a)
- deux positions (b et c) symétriques par rapport au centre de la maille.

En-dessous de la température de Curie, seules les positions b et c sont stables, la position médiane est instable. Au-dessus de cette température, c'est la position centrale qui est stable.

b) Interprétation énergétique

On peut chercher à évaluer l'énergie E(x) à fournir à la maille cristalline pour que l'ion Ti occupe une position x le long d'un axe de polarisation spontanée. Une théorie fournissant une courbe telle que celle de la figure 58 a (au-dessous du point de Curie), ou de la figure 58 b (au-dessus du point de Curie) est compatible avec le modèle de Känzig-Evans.

c) Domaines de polarisation spontanée dans un monocristal élémentaire

En-dessous de son point de Curie, un monocristal élémentaire peut être divisé en deux ou plusieurs domaines de polarisation spontanée. Ces domaines sont séparés par des "murs" formés de cellules cristallines à l'état cubique (instable). Pour une représentation simplifiée, on peut considérer qu'il y a un mur par monocristal élémentaire, et que ce mur est fait d'une seule couche de cellules à l'état cubique. Nous expliquerons les phénomènes d'hystérésis par les déplacements de ce mur, provoquant un déséquilibre des domaines de polarisation opposée.

./...

O = Ba ou Sr ; ⊘ = Ti ; ● = O

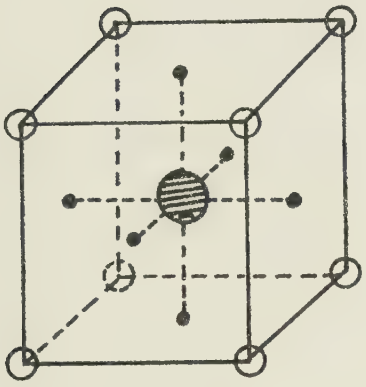


Fig 57a.

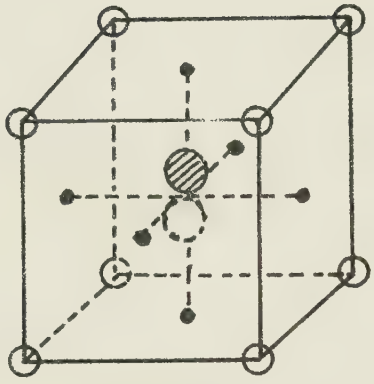


Fig 57 b.

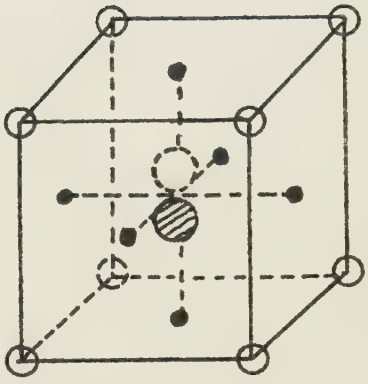


Fig 57 c.

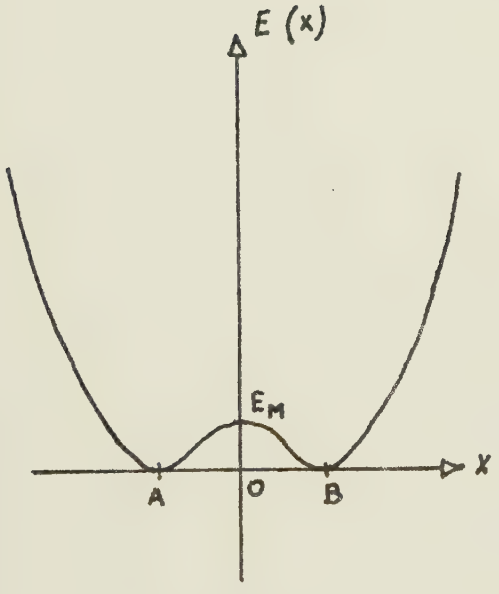


Fig 58a.

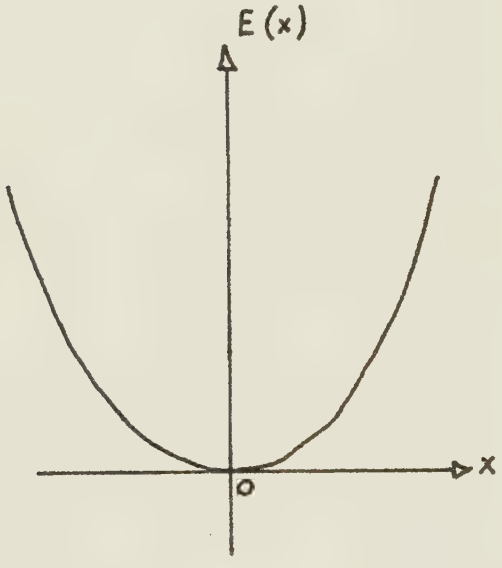


Fig 58 b.

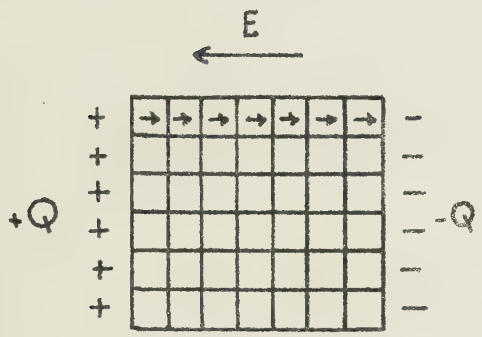


Fig 59

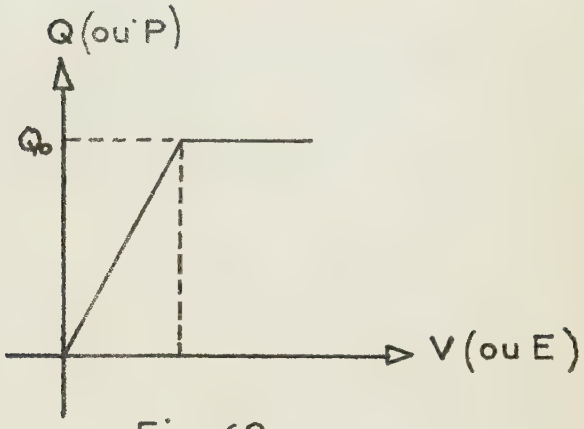


Fig 60

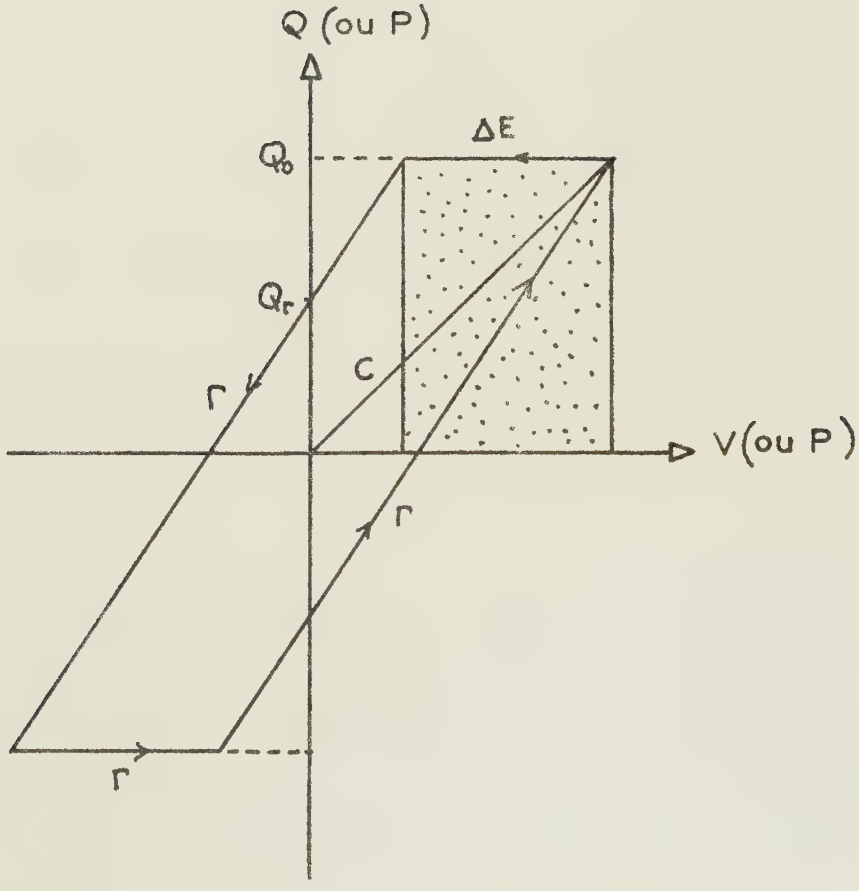


Fig 61

III - INTERPRETATION QUALITATIVE DU PHENOMENE D'HYSTERESIS

Nous supposons donc que nous appliquons un champ électrique à un ensemble de monocristaux d'orientations différentes. Ces cristaux peuvent être entièrement polarisés. Ils peuvent encore présenter deux domaines, séparés par un mur, dans lesquels les polarisations spontanées sont opposées. La proportion relative des monocristaux monodomaines est liée à l'histoire de l'échantillon céramique.

On interprétera les phénomènes d'hystérésis en admettant que :

- l'application d'un champ électrique provoque un déplacement des murs de polarisation spontanée

- le déplacement du mur à l'intérieur du cristal est réversible pour des champs peu élevés

- la formation et la disparition d'un mur ne sont pas des phénomènes réversibles.

Ainsi, lorsque l'on fait croître le champ électrique appliqué au monocristal, il en résulte un déplacement du mur continu et réversible. Lorsque le mur atteint l'extrémité du monocristal, ses cellules passent à l'état quadratique, en cédant à la céramique, sous forme de chaleur, une certaine énergie W. C'est à ce moment que la charge fictive $\pm$ Q apparaissant sur les faces normales à la direction de polarisation est maximum, puisque, le mur ayant disparu, toutes les mailles cristallines ont même polarisation. Notons Q_o le maximum de Q. Lorsqu'on laisse ensuite le champ décroître, il faut attendre une variation du champ ΔE, pour que le mur se reforme. Au cours de cette variation à charge constante, le champ a fourni au cristal une énergie : $\Delta W = Q_o \Delta E$ (Q_o est la charge du monocristal). On a représenté (fig. 60 - 61) la courbe de 1ère polarisation et le cycle d'hystérésis relatifs à un monocristal élementaire.

Le cycle observé dans le cas d'un condensateur dont le diélectrique est une céramique, s'obtient en superposant les cycles relatifs aux monocristaux élémentaires.

IV - INTERPRETATION DES CYCLES DE CAPACITE LOCALE

a) A la température de Curie

On peut calculer en fonction de la tension appliquée à la céramique la pente du cycle d'hystérésis T B F (0,25 Hz ; 46º C). On trouve une courbe ayant la forme du cycle de capacité locale à la température de Curie ; la pente de Γ est proportionnelle à la capacité différentielle C_d. La capacité différentielle maximum trouvée est assez voisine de la valeur maximum de la capacité locale mesurée à 50 Hz (capacité différentielle maximum calculée : 10 000 pF $\pm$ 2 000 pF ; capacité locale maximum mesurée : 5 000 pF $\pm$ 1 000 pF). Il paraît donc probable que le cycle de capacité locale se confond avec le cycle de capa-

.../...

cité différentielle, à la température de Curie ; cela revient à dire que les petites variations de capacité, comme les grandes, sont alors réversibles.

b) Aux températures inférieures à la température de Curie

On constate que :

- la forme des cycles de capacité locale est analogue à celle des cycles de capacité différentielle.

- par contre, la capacité locale mesurée est toujours plus faible que la capacité différentielle correspondante.

En outre, la capacité locale dépend de la fréquence. C'est cette variation avec la fréquence que nous nous proposons d'interpréter.

V - MISE EN EQUATION DU DEPLACEMENT DES MURS DE DOMAINES SOUS L'ACTION D'UN CHAMP ELECTRIQUE ALTERNATIF.

a) Mise en équation de Kittel (10) du déplacement des murs de domaines.

En vue d'expliquer la relaxation diélectrique, Kittel a utilisé le modèle que nous rappelons brièvement ci-dessous.

Sans faire intervenir l'étendue des domaines, et en supposant pour simplifier que le mur se réduit à une seule couche de cellules, on considère les cellules situées de part et d'autre du mur de domaines. Un déplacement du mur n'est autre qu'un changement de polarisation de deux cellules voisines, dû à un déplacement de l'ion titane. On note :

a : la longueur d'une cellule élémentaire

v_{T_i} : la vitesse de l'ion titane T_i^{++++}

v_w : la vitesse d'une paroi.

Si nous admettons qu'au passage du mur l'ion titane se déplace à une vitesse uniforme entre deux de ses positions d'équilibre, il existe une relation simple entre v_{T_i} et v_w. Supposons que dans le temps t, le mur se déplace de a

$$v_w \times t = a \qquad (1)$$

Pendant le même temps, un ion titane s'est déplacé de δ

$$v_{T_i} \times t = \delta \qquad (2)$$

On a donc :

$$v_{T_i} = \frac{\delta}{a} v_w \qquad (3)$$

.../...

Soit M la masse réduite de l'ion titane ; nous supposerons que le principal effet d'inertie dans le cristal est dû à la masse des ions titane, d'où l'énergie cinétique du mur pour la surface d'une cellule :

$$\frac{1}{2} M \left(v_{T_i}\right)^2 \qquad (4)$$

et pour l'unité de surface :

$$\frac{1}{2} \frac{M}{a^2} \left(v_{T_i}\right)^2 \qquad (5)$$

soit encore, compte tenu de (3) :

$$E = \frac{1}{2} \frac{M}{a^2} \left(\frac{\delta}{a}\right)^2 v_w^2 \qquad (6)$$

Introduisons alors ρ , masse effective par unité d'aire du mur :

$$E = \frac{1}{2} \rho \, v_w^2 \qquad (7)$$

En comparant (6) et (7), il vient :

$$\boxed{\rho = \frac{M \delta^2}{a^4}} \qquad (8)$$

On peut alors prendre comme équation du mouvement du mur, une relation de la forme :

$$\rho \frac{d^2x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + q\,x = K\,E \qquad (9)$$

r désignant un coefficient de frottement,
q une force de rappel.

Pour obtenir la fréquence de résonance, Kittel a calculé la force de rappel q, et il a pris : r = 0, en première approximation. Il obtient une pulsation de relaxation :

$$\boxed{\omega_o = \sqrt{\frac{q}{\rho}}} \qquad (10)$$

qu'il exprime ensuite en fonction des paramètres cristallins, pour passer aux applications numériques.

En prenant : $q = \dfrac{4 P_s^2}{D \chi_{do}}$

P_s : polarisation de saturation
D : taille d'un domaine
χ_{do} : susceptibilité statique

.../...

il trouve :

$$\omega_o = \sqrt{\frac{q}{\varepsilon}} = \frac{2\,Ps}{\sqrt{\rho\, D\, \chi_{do}}}$$

Dans l'application numérique, Kittel prend :

$$P_s = 50\,000 \text{ CGS}$$
$$\chi_{do} = 100$$
$$D = 10^{-2} \text{ cm}$$

et obtient la fréquence de résonance :

$$f_o = 2.10^9 \text{ Hz}$$

b) Cas du titanate de baryum et de strontium aux basses fréquences

Dans la phase ferroélectrique et au voisinage de la température de Curie, on constate que la valeur maximum de la capacité locale est une fonction décroissante de la fréquence (fig. 64). On peut admettre que dans cette gamme de températures, les parois de domaines peuvent subir des déplacements réversibles plus importants et que le coefficient de frottement r dans l'équation de Kittel n'est plus négligeable. L'accroissement de la constante diélectrique et des pertes diélectriques au voisinage du point de Curie confirme ces deux hypothèses.

En négligeant le terme $\rho \frac{d^2x}{dt^2}$ aux basses fréquences $0,1 < f < 10\,000$ c/s, l'équation du mouvement d'un mur :

$$\rho \frac{d^2x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + q\,x = K\,E \cos \omega t \qquad (11)$$

s'écrit

$$r \frac{dx}{dt} + q\,x = K\,E \cos \omega t \qquad (12)$$

La solution de cette équation s'obtient en superposant la solution générale de l'équation sans second membre à une solution particulière de l'équation complète. La solution générale de l'équation sans second membre :

$$r \frac{dx}{dt} + q\,x = 0 \qquad (13)$$

est :

$$x = C \cdot e^{-\frac{q}{r} t} \qquad (C = \text{constante}) \qquad (14)$$

Nous admettrons ici que r est suffisamment grand pour que ce terme ne donne pas lieu à des phénomènes observables à l'oscilloscope (régime transitoire). Il reste à trouver une solution particulière ; nous la supposons de la forme :

$$x = x_o \cos (\omega t - \varphi) \qquad (15)$$

.../...

On aura donc :

$$x_o(r\omega \sin\varphi + q \cos\varphi)\cos\omega t - x_o(-r\omega\cos\varphi + q\sin\varphi) = E\cos\omega t$$

L'identité des deux membres exige :

$$q \sin\varphi - r\omega\cos\varphi = 0 \qquad (16)$$

soit :

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{r\omega}{q} \qquad (17)$$

Il vient alors :

$$\cos\varphi = \frac{\pm q}{\sqrt{q^2 + r^2\omega^2}} \qquad (18)$$

$$\sin\varphi = \frac{\pm r\omega}{\sqrt{q^2 + r^2\omega^2}} \qquad (19)$$

A l'instant t = 0, (12) devient, compte tenu de (13) : $q\, x_o \cos\varphi = k\, E$ (14)

d'où

$$x_o = \frac{k\,E}{\sqrt{q^2 + r^2\omega^2}}\cos\omega t$$

On voit (fig. 64) que l'amplitude des déplacements du mur est une fonction décroissante de la fréquence.

La théorie des domaines de polarisation spontanée permet donc une interprétation vraisemblable des phénomènes observés ; d'autres manipulations plus précises seront nécessaires pour préciser les différents paramètres mis en jeu.

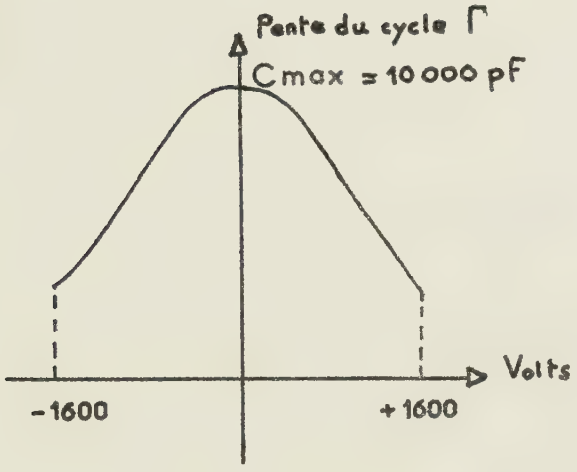


Fig 62

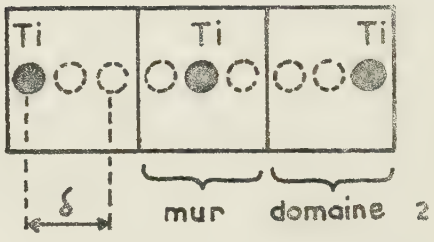


Fig 63

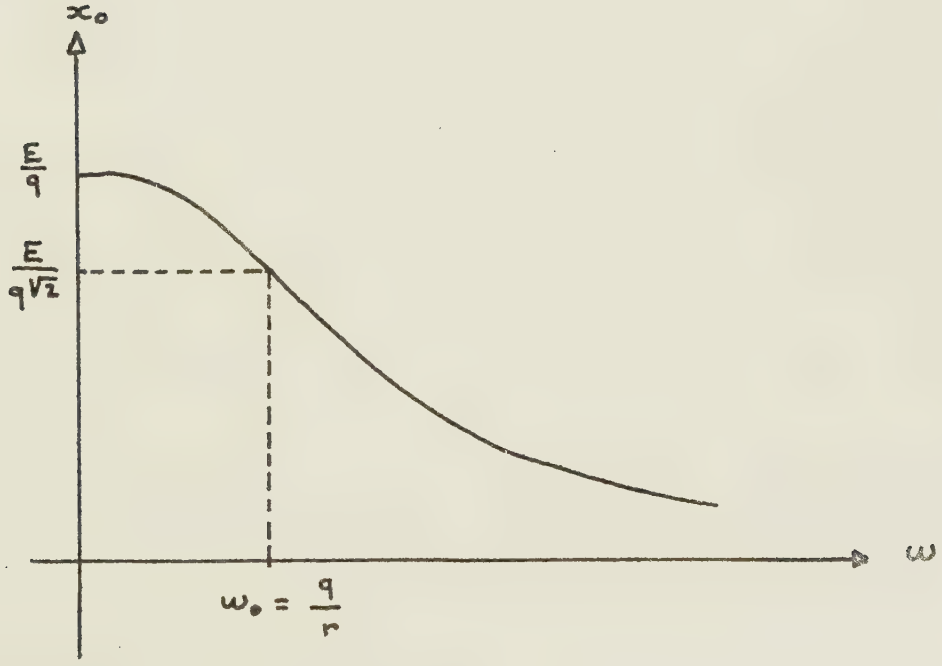


Fig 64

C H A P I T R E V

APPLICATION DES CERAMIQUES FERROELECTRIQUES A L'AMPLIFICATION TRES BASSE FREQUENCE

I - CONDITIONS D'UTILISATION DES CERAMIQUES FERROELECTRIQUES EN BASSE FREQUENCE

Il est très intéressant de se placer à la température de Curie de façon à n'avoir pas à cycler l'échantillon. Un condensateur à diélectrique ferroélectrique utilisé dans ces conditions se comporte comme une capacité dont la valeur dépend d'une tension continue de polarisation. (A une température inférieure à la température de Curie la capacité n'est plus une fonction uniforme de la tension de polarisation). Il peut donc jouer vis-à-vis d'une source de courant alternatif le rôle que joue un tube vis-à-vis d'une source de courant continu. Cette comparaison ne peut cependant pas être poussée très loin, car une capacité variable ne se comporte pas comme une résistance variable lorsqu'elle est placée en série avec une charge résistive. Supposons connectées en série : une source de courant alternatif, une capacité variable γ, une résistance R. La tension aux bornes de R a pour amplitude :

$$V = V_o \frac{R}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\gamma^2 \omega^2}}}$$

On voit sur cette formule que V n'est pas une fonction linéaire de γ. Il existe cependant un cas où cette condition est approximativement réalisée, c'est celui où :

$$\frac{1}{\gamma^2 \omega^2} \ll R$$

Nous en tirerons parti dans la réalisation du modulateur diélectrique.

.../...

II - LE MODULATEUR DIELECTRIQUE

L'amplification des courants continus est un problème difficile à résoudre avec les tubes ou les transistors. Lorsque l'on a réussi à monter en cascade des éléments dont l'entrée et la sortie se font à des potentiels continus très différents, on constate encore que la stabilité de l'ensemble est moins bonne que celle des amplificateurs à courants alternatifs. C'est pourquoi il est préférable d'utiliser le signal continu ou lentement variable pour moduler en amplitude une tension alternative sur laquelle on opère facilement une amplification de tension ou de puissance. On doit ensuite effectuer une détection pour obtenir la tension continue de sortie.

Nous pensons que les céramiques ferroélectriques sont très aptes à jouer le rôle de modulateurs, particulièrement aux très basses fréquences, et nous décrivons ici une réalisation de modulateur diélectrique simple.

Notons d'ailleurs que les amplificateurs diélectriques conventionnels (8) effectuent une modulation d'amplitude de l'onde fournie par une source de puissance. L'utilisation d'une céramique comme modulateur sépare en quelque sorte les fonctions modulation d'amplitude et amplification de puissance.

1º/ Principe du modulateur diélectrique

L'élément essentiel du modulateur est une capacité ferroélectrique en série avec une résistance r (fig. 65). Ce montage est alimenté entre B et M par un signal alternatif de pulsation fixe ω, et d'amplitude constante. (Exemple : fréquence 500 Hz ; amplitude 5 volts).

On sait que si $r \ll \frac{1}{\gamma \omega}$ on recueille en S une tension alternative dont l'amplitude est proportionnelle à la capacité .

D'autre part, on applique entre A et M une tension de commande de très basse fréquence V dont les composantes spectrales doivent être très inférieures à . Il est à remarquer que l'impédance de sortie de la source débitant la tension de commande peut être très élevée. La céramique ferroélectrique étant maintenue à sa température de Curie, la courbe : $\gamma = f(V)$ est linéaire autour d'une certaine valeur V_o (fig. 66).

On rappelle également que l'hystérésis ayant disparu à la température de Curie, on n'a pas à se soucier de cycler l'échantillon. Pour travailler dans une région linéaire, il suffit de faire en sorte que la tension de commande oscille entre V_1 et V_2.

Dans nos montages d'essais, nous avons fait précéder la céramique par un tube amplificateur qui joue deux rôles :

- assurer une préamplification,
- maintenir la tension moyenne V_o.

.../...

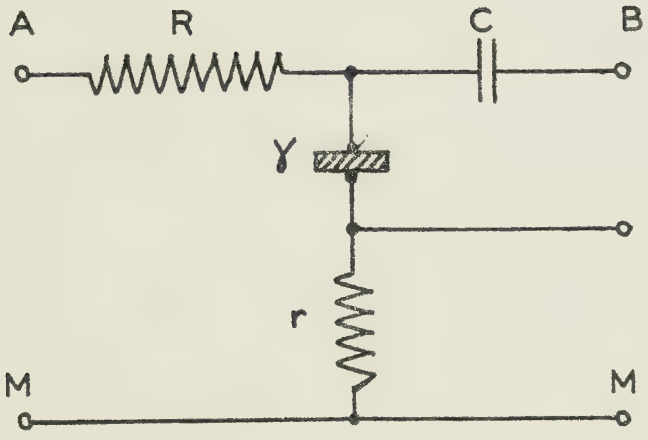


Fig 65

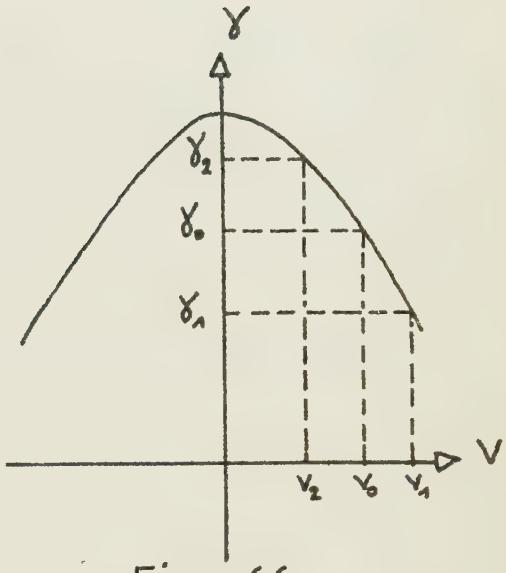


Fig 66

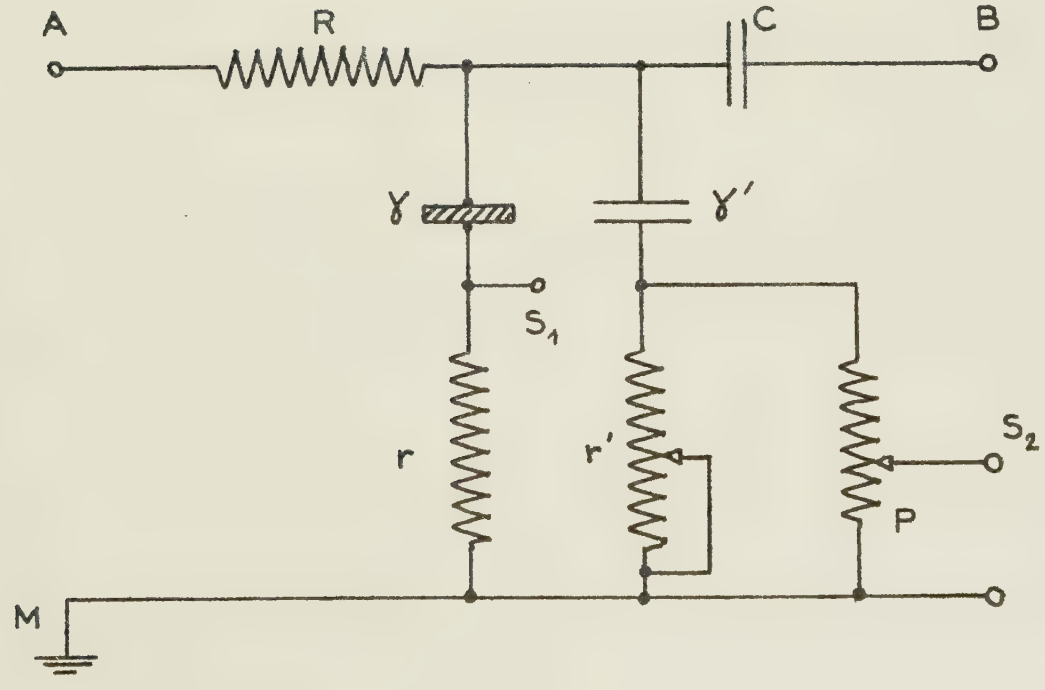


Fig 67 .

D'autre part, nous remarquons que la tension de sortie oscille autour d'une valeur moyenne $v_o = k \gamma_o$, mais reste supérieure à une certaine valeur $v_{min} = k \gamma_1$. Nous pouvons compenser v_{min}, de façon à augmenter le taux de modulation. C'est pourquoi le montage de la figure 65 est remplacé par un montage en pont suivi d'un amplificateur différentiel pour courants alternatifs. Cet amplificateur différentiel peut être très simple. Nous avons aussi obtenu de bons résultats en plaçant simplement entre S_1 et S_2 le primaire d'un petit transformateur, dont le secondaire était suivi d'un amplificateur pour courants alternatifs.

Nous donnons cependant un schéma comportant un amplificateur différentiel à tubes, qui nous a permis de faire des essais dans une gamme de fréquences plus importante.

2º/ Schéma d'un modulateur diélectrique

Le modulateur de la figure 68 comprend :

- un étage préamplificateur pour tension continue. Le tube ECC 82 est polarisé au moyen d'une diode de Zener qui remplace le système R-C utilisé avec des courants alternatifs,

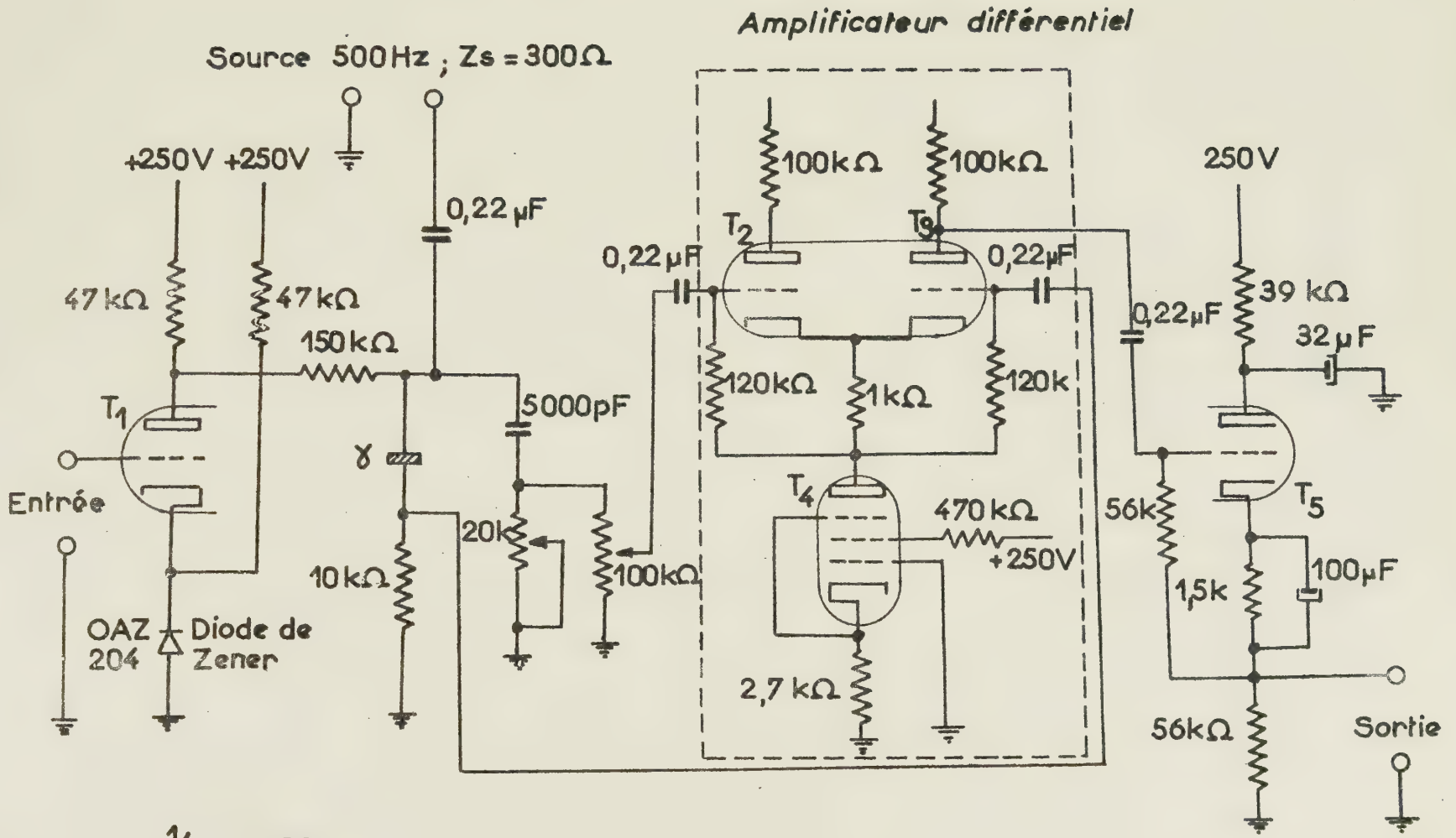
- le modulateur proprement dit

- un amplificateur différentiel, suivi d'un étage à basse impédance de sortie destiné à faire commodément des mesures.

L'utilité de l'étage préamplificateur serait évidemment très contestable dans une application où l'on voudrait profiter de la haute impédance d'entrée de la céramique, vis-à-vis du courant continu.

3º/ Résultats obtenus

Si la compensation de γ_1 est bien faite, on obtient une modulation d'amplitude très importante allant jusqu'à 90 % avec une bonne linéarité. Si l'on n'est pas tout à fait au point de Curie, le modulateur fonctionne toujours mais on observe des distorsions qui dépendent peu du taux de modulation (fig. 69 et 70).



$T_1 = T_5 = \frac{1}{2}$ ECC 82

$T_2 = T_3 = \frac{1}{2}$ ECC 83

T_4 = EF 86

Fig. 68 : Modulateur diélectrique d'essais

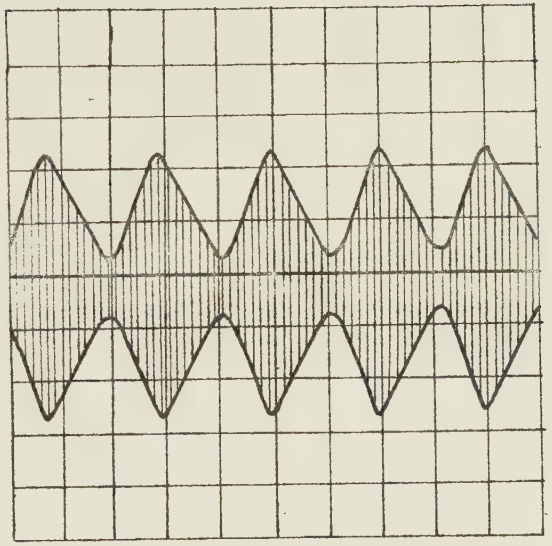


Fig .69 : Modulation en 'dents de scie'

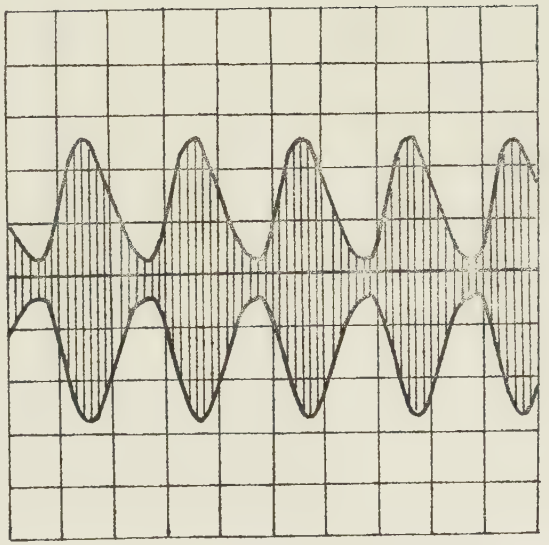


Fig.70 : Modulation sinusoïdale

C O N C L U S I O N

Le modulateur diélectrique décrit ici n'est qu'un montage d'essais. Tel qu'il est, il possède l'impédance d'entrée du tube d'attaque et l'impédance de sortie du cathode follower. La tension continue effectivement appliquée à la céramique oscille entre 30 et 250 volts lorsque l'on applique à l'entrée de l'étage préamplificateur une tension variant entre - 7,5 et + 7,5 volts. Avec un réglage correct du circuit de compensation, la variation de tension nécessaire à un taux de modulation de 80 % peut être beaucoup plus faible. La tension de sortie maximum est voisine de 30 volts efficaces. C'est la tension de saturation de l'amplificateur différentiel. Dans notre exemple, la tension de sortie varie entre 0 et 10 volts.

Nous pensons que certaines propriétés du montage peuvent être considérablement améliorées ; notons :

- la haute impédance d'entrée en courant continu de la céramique proprement dite,

- la linéarité de la modulation,

- des propriétés d'ordre pratique, telles que le faible encombrement, la robustesse, la durée de vie, ou le prix de revient.

Notons enfin que le modulateur diélectrique doit être suivi d'un amplificateur de tension ou de puissance pour courants alternatifs, et d'un détecteur approprié. La construction de l'amplificateur est simplifiée du fait qu'il travaille à fréquence fixe. Les diodes à cristal modernes permettent de résoudre facilement de nombreux problèmes de détection en basse fréquence.

B I B L I O G R A P H I E

(1) - DURAND E. (1953) - Electrostatique et magnétostatique - Masson (Paris)

(2) - W.P. MASON (1960) - Piezoelectric Crystals - Van Nostrand Company N-Y.

(3) - SACHSE (1958) - Les ferroélectriques (Traduction) - Dunod (Paris)

(4) - L. EYRAUD (1956) - Thèse Lyon

(5) - P. TURLIER (1959) - Thèse Lyon

(6) - Mme M. FETIVEAU (1961) - Thèse Lyon

(7) - J.R. ANDERSON - Ferroelectric storage elements for Digital Computers and Switching Systems. Electrical Engineering - Octobre 1962

(8) - A.M. VINCENT - Dielectric Amplifier Fundamentals.Electronics - Déc. 1951

(9) - H. URKOWITZ - A ferroelectric Amplifier - J.F.I. - Déc. 1952

(10) - C. KITTEL - Physical Review 83 p. 458 - July 15, 1951

(11) - W.P. MASON - Ferroelectrics and the Dielectric Amplifier - Proceeding of the I.R.E. - p. 1606 à 1620 - Nov. 1954

(12) - KANZIG WERNER (1957) - Ferroelectrics and Antiferroelectrics Solid State Physics - Vol. 4 p. 1 à 197 - Academic Press (New York)

(13) - C. KITTEL (1956) - Introduction to Solid State Physics - Chap. 8 John Wiley & Sons (New York)

(14) - A. Von HIPPEL (1959) - Molecular science and molecular engineering - The technology press of M.I.T.

VU :

Les Membres du Jury,

MM. A. SARAZIN

R. CHERY

J. LAFOUCRIERE

L. EYRAUD

VU
et approuvé :

Le Doyen de la Faculté des Sciences

J. BRACONNIER

VU et accordé le permis d'imprimer :

LYON, le 8 Novembre 1962

Le Recteur,
Président du Conseil de l'Université

P. LOUIS